



**Miguel de Carvalho
dos Santos Garcia**

**Simulação dinâmica de edifícios com
componentes integrando PCM**



**Miguel de Carvalho
dos Santos Garcia**

**Simulação dinâmica de edifícios com
componentes integrando PCM**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Nelson Amadeu Dias Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Romeu da Silva Vicente, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutora Mónica S. A. de Oliveira Correia

Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Romeu da Silva Vicente

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (coorientador)

Prof. Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (arguente)

Agradecimentos / Acknowledgements

Começo por agradecer aos meus orientadores científicos Professor Doutor Nelson Martins e Professor Doutor Romeu Vicente, pela orientação, encorajamento e sugestões essenciais para a realização desta dissertação.

À Universidade de Aveiro por me acolher na fase mais importante da minha vida, pelas condições de estudo disponibilizadas e pelo ótimo ambiente existente na instituição, fazendo com que leve não só a universidade mas também a cidade de Aveiro no coração.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica e a todos os seus docentes e funcionários pela competência, simpatia e disponibilidade demonstradas ao longo destes anos.

Ao NEEMec-AAUAv e aos colegas que me acompanharam ao longo de três anos, por me ajudarem a trabalhar em prol de toda a comunidade de curso e por me proporcionarem tão boas experiências e amizades.

Ao BEST Aveiro e a todas as pessoas que participaram comigo nesta associação, em especial aos colegas das competições, pelos ensinamentos, pelas experiências vividas e pelos desafios constantes.

Ao grupo fantástico de amigos que tenho, por todo apoio e amizade demonstrados, foram absolutamente essenciais não só no meu percurso escolar e académico, mas também na pessoa que sou hoje.

À Bárbara, por todo o amor, apoio e compreensão, pela motivação constante ao longo deste trabalho e pela tranquilidade que diariamente me transmite.

Um agradecimento especial à minha família. Aos meus irmãos Paulo e Xana, pelo carinho, amizade, união e pelo extraordinário exemplo que sempre foram e hão-de ser para mim. Aos meus pais, pela educação e amor dados e por me terem proporcionado sempre as melhores condições possíveis.

A todos o meu muito OBRIGADO!

Palavras-chave

Simulação dinâmica de edifícios; Materiais mudança de fase (PCM); Eficiência energética; Medidas passivas; Armazenamento de calor latente

Resumo

O crescente consumo de energia primária a nível mundial deu origem a uma crise não só ambiental mas também económica, derivada das limitações das reservas energéticas e do fornecimento. Estas preocupações têm levado a um estudo cada vez mais aprofundado no que concerne à eficiência energética de edifícios. É neste contexto que surge o estudo da aplicação dos materiais mudança de fase (PCM) na térmica de edifícios.

Esta dissertação tem como principal objetivo compreender o efeito de envolventes com PCM no consumo energético, através das necessidades de climatização. Para tal, pretende-se compreender onde e como devem ser aplicados estes materiais, estudar o seu comportamento nas estações de aquecimento e arrefecimento e avaliar a necessidade de estratégias complementares de modo a otimizar soluções com PCM.

No desenvolvimento do trabalho recorreu-se às ferramentas de simulação dinâmica *DesignBuilder* e *EnergyPlus* de modo a analisar todo o problema. Estudou-se a aplicação de PCM para quatro localizações em Portugal continental (Lisboa, Porto, Bragança e Faro), sendo posteriormente proposta uma solução adequada às necessidades de aquecimento e arrefecimento para cada caso. Foram ainda estudadas formas de melhoramento do desempenho de soluções com PCM como ventilação natural, ventilação mecânica noturna e diferentes opções de sombreamento.

O estudo constatou a relevância da incorporação de PCM na envolvente do edifício obtendo reduções significativas nas necessidades de climatização. No entanto, a implementação de estratégias de ventilação, essencialmente noturna para permitir a descarga térmica do PCM, e a limitação dos ganhos solares através de sombreamento provaram ser fundamentais para o correto funcionamento e desempenho dos PCM.

Keywords

Building energy simulation; Phase Change Materials (PCM); Energy efficiency; Passive measures; Latent heat storage

Abstract

The growth in energy consumption worldwide has led to both environmental and economic crisis, due to the exhaustion of energy resources and supply restrictions. These concerns resulted in a demand for deeper studies regarding energy efficiency in buildings. It is in this context that the study of Phase Change Materials (PCM) in building applications turned up.

The main objective of this thesis is to assess the effect of PCM enhanced solutions on heating and cooling demands. Therefore, this work aims to understand the following issues: where and how should PCM be incorporated in the envelope, how to optimize the performance of PCM solutions in both summer and winter and to assess the need of complementary strategies in order to improve the thermal performance of the PCM.

The dynamic simulation tools used were *DesignBuilder* and *EnergyPlus*. Firstly, the PCM application is studied for four locations in Portugal (Lisboa, Porto, Bragança and Faro), for which is later proposed a solution that optimizes heating and cooling needs. Secondly, ways to improve the performance of PCM solutions are studied, such as natural ventilation, night-time mechanical ventilation and shadowing.

The study concludes that the incorporation of PCM in the building envelope results in significative reductions in heating and cooling demands. However, it was also stated the need for ventilation strategies, essentially in night-time, in order to complete the thermal discharge of the PCM. The limitations of solar gains through shadowing has also proven to be fundamental to the correct behaviour of the PCM, by avoiding the over-heating of the test cell which would interfere with its thermal discharge.

À memória do meu pai

Conteúdo

Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Símbolos e Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Revisão bibliográfica	2
1.3.1 Contributo de PCM para a eficiência energética de edifícios	2
1.3.2 Simulação dinâmica	5
1.3.3 Síntese	8
1.4 Contributo da dissertação	9
1.5 Estrutura do documento	10
2 Materiais mudança de fase	11
2.1 Classificação	12
2.1.1 PCM orgânicos	12
2.1.2 PCM inorgânicos	13
2.1.3 Misturas eutécticas	13
2.2 Propriedades	13
2.3 Incorporação de PCM em soluções construtivas	14
2.3.1 Microencapsulamento	14
2.3.2 Macroencapsulamento	15
2.3.3 Imersão e incorporação direta	15
2.4 Outras aplicações	16
2.4.1 Sistemas solares para aquecimento de água	16
2.4.2 Sistemas solares para aquecimento do ar	17
2.4.3 Parede trombe	17
2.5 Síntese do capítulo	18
3 Análise do comportamento térmico de edifícios	19
3.1 Transferência de calor em edifícios	19
3.1.1 Condução	20
3.1.2 Convecção	21
3.1.3 Radiação	21

3.1.4	Inércia térmica	22
3.2	Análise estática (metodologia RCCTE)	22
3.3	Análise dinâmica (<i>DesignBuilder/EnergyPlus</i>)	23
3.4	Síntese do capítulo	25
4	Metodologia de análise	27
4.1	Modelo de simulação	27
4.1.1	Considerações gerais	27
4.1.2	Caracterização do edifício de teste	29
4.1.3	Caracterização dos PCM utilizados	31
4.1.4	Dados climáticos	31
4.2	Abordagem	32
4.2.1	Indicadores de referência	32
4.2.2	Procedimentos	34
4.3	Síntese do capítulo	36
5	Resultados e análise	39
5.1	Aplicação de componentes com PCM	39
5.1.1	Lisboa	39
5.1.2	Porto	41
5.1.3	Bragança	42
5.1.4	Faro	44
5.1.5	Implicações nas amplitudes térmicas diárias e picos de temperatura	45
5.2	Análise de sensibilidade	47
5.2.1	Renovações de ar	47
5.2.2	Ventilação noturna	48
5.2.3	Sombreamento	50
5.3	Impacto global das soluções	52
5.4	Síntese do capítulo	53
6	Conclusões e trabalho futuro	55
6.1	Conclusões gerais	55
6.2	Sugestões de trabalho futuro	56
A	Anexos	65
A.1	Curvas temperatura-entalpia dos PCM utilizados	65
A.2	Dados climáticos	68

Lista de Tabelas

3.1	<i>Inputs e outputs do EnergyPlus [53]</i>	24
4.1	Definição dos ganhos internos do modelo de simulação	28
4.2	Parâmetros de cálculo das renovações por hora mínimas	29
4.3	Caracterização da envolvente do edifício de teste	30
4.4	PCM de baixa temperatura de fusão utilizados	31
4.5	PCM de alta temperatura de fusão utilizados	31
4.6	Parâmetros de cálculo do indicador anual das necessidades de climatização para os sistemas referenciados pelo RCCTE [52]	33
5.1	Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Lisboa	40
5.2	Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Porto	42
5.3	Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Bragança	43
5.4	Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente e PCM 25/25, Faro	45
5.5	Reduções máximas e médias relativas às amplitudes térmicas diárias decorrentes da aplicação dos PCM de baixa temperatura de fusão, em °C	46
5.6	Reduções máximas e médias relativas às amplitudes térmicas diárias decorrentes da aplicação dos PCM de alta temperatura de fusão, em °C	46
5.7	Reduções máximas e médias relativas aos picos de temperatura mínima decorrentes da aplicação dos PCM de baixa temperatura de fusão, em °C	46
5.8	Reduções máximas e médias relativas aos picos de temperatura máxima decorrentes da aplicação dos PCM de alta temperatura de fusão, em °C	47
5.9	Reduções nos indicadores obtidas pelas diferentes estratégias	52
6.1	Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas estações de arrefecimento e de aquecimento e respetivas soluções abrangentes, em °C	56
A.1	Graus-dia exteriores para as quatro localizações simuladas	68

Lista de Figuras

2.1	Comportamento dos PCM em termos de calor sensível e latente armazenado, adaptado de [35]	11
2.2	Temperaturas e entalpias de fusão para os diferentes grupos de PCM [3]	12
2.3	Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM - ThermalCORE™, National Gypsum [40]	15
2.4	(a) Placas BioPCM™; (b) Exemplo de aplicação das soluções BioPCM™[43]	16
2.5	Exemplo de sistema solar para aquecimento de água com recurso a PCM [48]	16
2.6	Exemplo de sistema solar para aquecimento do ar com recurso a PCM [47, 49]	17
2.7	Esquema de funcionamento de uma parede trombe [50]	17
3.1	Representação das trocas de calor envolvidas no balanço térmico de edifícios [51]	20
3.2	Exemplificação da mudança de comportamento do calor específico com a mudança de fase	23
3.3	Descrição do processo de simulação dinâmica, adaptado de [55]	25
3.4	Descrição da integração de PCM no processo de simulação dinâmica, adaptado de [55]	25
4.1	Perfil de ocupação [56]	27
4.2	Perfil de utilização relativo à iluminação [56]	28
4.3	Perfil de utilização relativo a outros equipamentos [56]	28
4.4	Edifício de teste, visto de sul	29
4.5	Edifício de teste, visto de norte	30
4.6	(a) Zonas climáticas de inverno ; (b) Zonas climáticas de verão [52]	32
4.7	Perfis das temperaturas interiores consoante os diversos tipos de PCM utilizados para Lisboa, na semana de projeto de verão	34
5.1	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Lisboa	39
5.2	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Lisboa	40
5.3	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Porto	41
5.4	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Porto	41

5.5	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Bragança	42
5.6	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Bragança	43
5.7	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Faro	44
5.8	Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Faro	44
5.9	Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com as rph	47
5.10	Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical da esquerda) com as rph e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical da direita)	48
5.11	Exemplificação do funcionamento da ventilação mecânica noturna para o período de 20 a 23 de junho	49
5.12	Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com as rph de ventilação noturna	49
5.13	Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical à esquerda) com as rph de ventilação noturna e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical à direita)	50
5.14	Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com o tipo de sombreamento	51
5.15	Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical à esquerda) com o tipo de sombreamento e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical à direita)	51
A.1	Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm®RT 15, valores retirados de [58]	65
A.2	Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm®RT 18 HC, valores retirados de [58]	65
A.3	Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q21, valores retirados do <i>DesignBuilder</i>	66
A.4	Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q23, valores retirados do <i>DesignBuilder</i>	66
A.5	Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q25, valores retirados do <i>DesignBuilder</i>	66
A.6	Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q27, valores retirados do <i>DesignBuilder</i>	67
A.7	Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q29, valores retirados do <i>DesignBuilder</i>	67
A.8	Temperaturas exteriores anuais - Lisboa, retirado do <i>DesignBuilder</i>	68
A.9	Temperaturas exteriores anuais - Porto, retirado do <i>DesignBuilder</i>	69
A.10	Temperaturas exteriores anuais - Bragança, retirado do <i>DesignBuilder</i> . .	70
A.11	Temperaturas exteriores anuais - Faro, retirado do <i>DesignBuilder</i>	71

Lista de Símbolos e Acrónimos

A_p	Área útil de pavimento [m^2]
A_s	Área de superfície [m^2]
AVAC	Ar, Ventilação e Ar Condicionado
COP	Coefficient of Performance
C_p	Calor específico [$J/(kg.K)$]
DSC	Differential Scanning Calorimeter
EPS	Expanded polystyrene
F_{pu}	Fator de conversão entre energia útil e energia primária
GD	Graus-dia [$^{\circ}C.dia$]
GD²⁵_{arref}	Graus-dia de arrefecimento na base 25°C [$^{\circ}C.dia$]
GD²⁰_{aquec}	Graus-dia de aquecimento na base 20°C [$^{\circ}C.dia$]
h_{conv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção [$W/(m^2.^{\circ}C)$]
I^{GD}_{anual}	Indicador anual das necessidades de climatização baseado nos graus-dia
IDF	Input Data File
k	Condutibilidade térmica do material [$W/(m^2.^{\circ}C)$]
M_{si}	Massa superficial útil do elemento <i>i</i> [kg/m^2]
ṁ	Caudal mássico [kg/m^3]
ocup	Ocupante
Q_{cond}	Calor transferido por condução [W]
Q_{conv}	Calor transferido por convecção [W]
Q_{ext}	Trocas de calor através de elementos em contacto com o exterior [W]
Q_{gu}	Ganhos térmicos brutos [W]
Q_i	Ganhos internos [W]
Q_{PCM}	Transferência de calor latente devido à incorporação de PCM
Q_{rad}	Calor transferido por radiação [W]
Q_S	Ganhos solares [W]
Q_T	Trocas de calor por condução através da envolvente [W]
Q_V	Trocas de calor devido às renovações de ar [W]
q̇_{min}	Caudal mínimo de ar novo [$\frac{m^3}{h.ocup}$]
R_j	Resistência térmica da camada <i>j</i> [$m^2.^{\circ}C/W$]
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior [$m^2.^{\circ}C/W$]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior [$m^2.^{\circ}C/W$]
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
rph	Renovações por hora [h^{-1}]
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
S_i	Área da superfície interior do elemento <i>i</i> [m^2]

SA	Solução abrangente
SDW	Summer Design Week
T	Temperatura absoluta [K]
T_{ext}	Temperatura exterior [$^{\circ}C$]
T_{fus}	Temperatura de fusão [$^{\circ}C$]
T_{int}	Temperatura interior [$^{\circ}C$]
T_s	Temperatura de superfície [$^{\circ}C$]
T_{∞}	Temperatura do fluido [$^{\circ}C$]
U	Coefficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$]
V	Volume da célula de teste [m^3]
ΔT_d	Amplitude térmica diária [$^{\circ}C$]
ΔT_p	Redução dos picos de temperatura [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{d,max}$	Amplitude térmica diária máxima [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{d,med}$	Amplitude térmica diária média [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{p,max}$	Redução máxima dos picos de temperatura máxima [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{p,med}$	Redução média dos picos de temperatura [$^{\circ}C$]
$\Delta T_{p,min}$	Redução máxima dos picos de temperatura mínima [$^{\circ}C$]
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura
$\frac{dh}{dt}$	Variação de entalpia
ε	Emissividade
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
η	Rendimento
η_u	Fator de utilização dos ganhos térmicos
®	Marca Registada
™	Marca

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas, o crescente consumo de energia primária a nível mundial gerou preocupações relativamente às limitações das reservas energéticas, ao seu fornecimento e ao impacto ambiental resultante do aumento das emissões de CO₂ [1]. A fatia do consumo global relativa a edifícios é de 20% a 40% para os países desenvolvidos, ultrapassando a indústria e os transportes. Este facto deve-se ao aumento da população mundial, ao crescimento do setor dos serviços e à exigência quanto aos níveis de conforto. Desta forma, a eficiência energética de edifícios ganhou importância, sendo atualmente um dos principais objetivos das políticas energéticas em todo o mundo [1].

Em termos legislativos, foi introduzida em 2002 pela Comissão Europeia a Diretiva relativa ao Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) [2]. Reformulada em 2010, esta veio reforçar o quadro de promoção do desempenho energético de edifícios, assentando nos objetivos traçados pelos estados-membros da União Europeia para o horizontes temporais de 2020 e 2050. Esta diretiva estabelece que cada estado-membro deve implementar sistemas de certificação energética que avaliem a qualidade térmica de todos os edifícios, sejam eles públicos ou particulares. A definição de requisitos e avaliação do desempenho térmico de edifícios passam a ser feitas tendo em conta dois pontos fundamentais, o comportamento térmico dos edifícios e a eficiência de sistemas, sejam estes ativos ou passivos. Nesta avaliação, para além de requisitos genéricos, é tida em conta a especificidade dos diferentes tipos de edifícios: qualidade do ar interior no caso dos edifícios de habitação ou instalação e manutenção de sistemas técnicos no caso dos edifícios de serviços. Para além disto, a diretiva define também requisitos específicos para edifícios novos, existentes e com necessidade de intervenção. Apesar de apresentar um plano a longo prazo, este protocolo apresenta um mapa evolutivo de requisitos permitindo que se facilite a antecipação e o ajustamento do mercado ao longo do tempo, bem como a própria adaptação dos requisitos regulamentares.

É neste cenário que surge o estudo da aplicabilidade de soluções passivas como os materiais mudança de fase (PCM) na térmica de edifícios. A aplicação destes materiais tem como objetivo a redução das necessidades de aquecimento ou arrefecimento, levando à poupança de energia de sistemas de climatização e indo ao encontro da legislação agora vigente.

1.2 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como objetivo quantificar o impacto sobre o desempenho energético de edifícios de serviços através da incorporação de materiais com mudança de fase (PCM) nas soluções construtivas adotadas, recorrendo a ferramentas de simulação dinâmica.

Neste trabalho, através de simulações computacionais, pretende-se abordar os seguintes pontos referentes à aplicação de PCM em edifícios:

- Em que soluções construtivas estes devem ser incorporados;
- Localização para as soluções construtivas com PCM na envolvente do edifício;
- Avaliar o efeito no consumo energético de edifícios;
- Comportamento nas estações de arrefecimento e aquecimento;
- Articulação com sistemas de climatização.

1.3 Revisão bibliográfica

1.3.1 Contributo de PCM para a eficiência energética de edifícios

Se os PCM forem selecionados de acordo com as condições climatéricas em questão, um aumento da temperatura ambiente leva à quebra das ligações químicas fazendo com que este transite do estado sólido para o estado líquido. Quando a temperatura ambiente decresce, o material regressa novamente ao estado sólido, libertando o calor absorvido. Este ciclo permite estabilizar a temperatura no interior dos edifícios, bem como reduzir o impacto das cargas solares e prevenir eventuais picos energéticos relativos ao arrefecimento, reaproveitar o calor absorvido para arrefecimento noturno, entre outros.

Os objetivos da aplicação de PCM em edifícios passam por aumentar a inércia térmica destes, melhorar o conforto térmico e reduzir os consumos energéticos relativos a sistemas de climatização [3]. As principais dificuldades passam por conseguir uma correta articulação com estes sistemas, encontrar a localização adequada para os componentes com PCM e otimizar o desempenho destes quer para a estação de aquecimento, quer para a de arrefecimento [3].

Impacto da incorporação em soluções construtivas

Os PCM podem ser integrados em qualquer material de construção poroso [3]. A transferência de calor latente torna-se bastante atrativa neste campo, uma vez que confere ao material em questão uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume. O calor latente de fusão de um PCM chega mesmo a ser dezenas de vezes superior à capacidade calorífica de materiais de construção correntes [3]. Isto verifica-se dando o exemplo [4] da incorporação de 30% de um determinado PCM (com calor latente de fusão de 200 kJ/kg) em betão (capacidade calorífica aproximadamente 0.92 $kJ/(kg.^{\circ}C)$) e para uma variação de temperatura de 4 $^{\circ}C$ (equação 1.1):

$$\Delta H = 0.3 \cdot \Delta H_{PCM} + 0.7 \cdot \Delta H_{betao} = 0.3 \cdot 200 + 0.7 \cdot (0.92 \cdot 4) = 62.8 \text{ kJ/kg} \quad (1.1)$$

Com isto, é possível verificar que o betão com PCM impregnado tem uma capacidade de armazenamento de calor cerca de 17 vezes superior à do betão corrente, provando desta forma a enorme potencialidade dos PCM no desempenho térmico de edifícios.

Os materiais mais utilizados para a implementação de PCM são o betão e o gesso cartonado, sendo que há diversas experiências envolvendo aplicações em tijolos, materiais isolantes, envidraçados e azulejos [5].

Peippo et al. [6] realizaram testes em casas de 120 m² localizadas em Helsínquia (Finlândia) e em Madison (Wisconsin, EUA), colocando placas de gesso cartonado de 13 mm com 30% de PCM (calor latente de 152 e 153 kJ/kg) e com objetivo de avaliar o impacto destes componentes no consumo energético na estação de aquecimento. Para tal, foram feitas simulações em ambos os locais para dois intervalos de temperaturas de conforto, 19-21 °C e 18-26 °C, chegando a reduções de 6% (2 GJ/ano) e 15% (3 GJ/ano) no consumo de energia auxiliar relativo a aquecimento para Helsínquia e Madison, respetivamente. Concluíram também que as poupanças energéticas são consideravelmente superiores se se admitir um intervalo de temperaturas de conforto maior. Darkwa et. al [7] verificaram a tendência de poupança energética desta aplicação, para temperaturas exteriores de 12 a 22 °C, obtendo resultados mais significativos no que diz respeito à temperatura interior mínima (aumento de 17%), expressando uma melhoria considerável do conforto térmico.

Cabeza et al. [8] fizeram ensaios em cubículos de 4 m² feitos de betão com e sem PCM, localizados em Lleida (Espanha). Os resultados demonstraram um aumento da inércia térmica considerável, com reduções das temperaturas interiores e atraso no ciclo do PCM. Contudo, levantam-se algumas dúvidas quanto ao uso de PCM no betão [4]: os PCM são aplicados em materiais de construção com o objetivo de aumentar a inércia térmica do edifício, algo que é facilmente atingido aplicando estes materiais nas placas de gesso cartonado que são facilmente implementadas em construções tradicionais. Para além disto, as estruturas de betão já possuem por si só uma inercia térmica elevada, tornando o uso de PCM em construções tradicionais leves especialmente atraente. Ainda assim, a implementação de PCM em soluções construtivas de betão pode ser interessante. Tendo em conta as características térmicas e espessuras comuns de utilização de cada um dos materiais, o betão com PCM incorporado apresenta uma capacidade calorífica global aproximadamente dez vezes superior à das placas de gesso cartonado [3].

Kosny et al. [9, 10, 11] testaram a impregnação de PCM em materiais isolantes, mais concretamente em espumas celulósicas e de poliuretano. Em ambos os ensaios verificaram-se reduções nas cargas de arrefecimento, respetivamente 20% e 40% para as horas de pico, sendo a redução no segundo caso tão significativa pois trata-se de um sótão.

Principi e Fioretti [12] testaram a aplicabilidade de tijolo furado com PCM que demonstrou ser capaz de, não só reduzir os picos de cargas térmicas em 25%, mas também de adiar em seis horas a libertação do calor acumulado para as horas em que seria mais proveitosa (arrefecimento noturno).

Localização de componentes com PCM

Para além de saber como, interessa saber onde melhor implementar soluções construtivas integrando PCM, não só do ponto de vista térmico mas também por uma questão de viabilidade económica, racionalizando o uso destes materiais.

Cabeza et al. [8] nos cubículos de betão com PCM testados, apenas colocaram betão modificado com PCM nas paredes viradas a sul, a oeste e na laje de cobertura. Isto deve-se ao facto destas paredes serem atingidas pelas cargas solares, sendo úteis para prevenir o sobreaquecimento dos cubículos armazenando a energia proveniente destas cargas, concluindo que não faria sentido a aplicação de PCM numa parede que não é atingida como é o caso da parede virada a norte. Nas paredes viradas a sul verificou-se uma redução de 2 °C na temperatura máxima e é atingida duas horas mais tarde, permitindo libertar o calor armazenado no período de arrefecimento. Já a temperatura interior máxima é reduzida cerca de 1 °C e as mínimas em cerca de 2 °C, beneficiando as condições de conforto. Nos seus testes, Peippo et al. [6] também colocaram painéis de gesso cartonado com PCM no compartimento virado a sul, beneficiando dos ganhos solares durante quase todo o dia. Os vãos envidraçados são elementos com grande responsabilidade na transferência de calor entre o exterior e o interior do edifício devido à passagem das cargas solares, sendo da maior importância potenciar estes componentes do ponto de vista térmico. Uma aplicação de PCM em envidraçados é apresentada por Goia et al. [13], obtendo um efeito muito positivo no conforto térmico devido à estabilização da temperatura interior. Orientada a sul, o impacto desta solução é tanto maior quanto a irradiação solar, ao invés de períodos nublados em que os resultados são idênticos a um envidraçado sem PCM. Estes factos permitem concluir que, para climas nublados esta solução perde a relevância, já para climas com muito sol torna-se uma solução bastante atrativa passando a questão a ser a temperatura de transição do PCM a escolher, prevenindo um sobreaquecimento no interior. Stamatiadou et al. [14] testaram a influência da incorporação de PCM em azulejos de mármore, num pavimento de um anexo envidraçado de uma habitação exposto à radiação solar durante o dia e orientado a sul. O estudo obteve uma redução máxima do consumo relativo ao aquecimento de 4%, justificando a adequabilidade desta solução para a estação de aquecimento em países do sul da Europa.

Desempenho nas estações de aquecimento e arrefecimento

Das tarefas mais complicadas em sistemas de armazenamento de calor latente recorrendo a PCM é tornar estes componentes adequados quer para a estação de aquecimento, quer para a de arrefecimento. Teoricamente, o ideal seria proceder a uma troca de PCM por estação, pois no verão interessaria um PCM com uma temperatura de fusão mais elevada do que no inverno. Uma vez que os PCM se encontram impregnados no material, este facto implicaria uma mudança periódica de soluções construtivas, o que seria insustentável.

Weinläder et. al [15] analisaram o impacto em ambas as estações instalando um painel de PCM num envidraçado duplo. No inverno, o conforto térmico melhorou consideravelmente de noite, devido a reduções na ordem dos 30% das perdas de calor a sul. Por outro lado, no verão os ganhos solares foram reduzidos em 50% e este calor seria libertado já no final do dia, tornando esta solução bastante útil para escritórios ou edifícios de serviços, na medida em que permitiria reduzir os picos de arrefecimento e consequentemente uma melhoria do conforto térmico. O mesmo poderá não se verificar para habitações, pois poderiam eventualmente sobreaquecer neste período.

Cerón et al. [16] avaliaram a capacidade de um pavimento de tijoleira com PCM na estação de aquecimento que se encontra num compartimento interior com alta per-

centagem de envidraçados. Servindo de bateria térmica, no inverno este armazena calor durante o dia, libertando-o durante a noite, passando a funcionar como piso radiante. Por outro lado, os resultados permitiram concluir que esta acumulação também pode funcionar na estação de arrefecimento embora que, para ter a eficácia desejada, seria necessária a alteração da temperatura de transição do PCM.

Compatibilização com sistemas de climatização

A articulação com sistemas ativos de climatização pode não só melhorar o desempenho do armazenamento de calor latente por parte dos PCM, bem como economizar o seu próprio consumo energético. No que diz respeito à poupança energética destes sistemas, essa já vem sendo abordada como um dos principais benefícios não só para habitações mas sobretudo para edifícios de serviços. Posto isto, há algumas formas em que os sistemas de climatização podem ser úteis no ciclo dos PCM.

No seu trabalho, para além de terem verificado a viabilidade das soluções construtivas com PCM adotadas, Castell et al. [17] depararam-se com problemas na solidificação do PCM em alguns períodos do estudo. Para resolver este problema, é sugerida uma estratégia de arrefecimento sendo as mais óbvias a ventilação mecânica ou natural, ajudando a completar o ciclo diário carga-descarga do PCM. Por sua vez, Cabeza et al. [8] também referem a necessidade de um arrefecimento noturno, caso este não se dê naturalmente (condições meteorológicas inesperadas, por exemplo) poderá ser salvaguardado de uma forma semelhante.

1.3.2 Simulação dinâmica

Existem diversos modelos capazes de simular o comportamento de PCM na envolvente de edifícios, embora muitos pequem ora pela falta de validação experimental, ora pelo facto de não estarem associados a um programa de simulação [18]. Existem bastantes ferramentas de simulação dinâmica de edifícios, contudo, os modelos que se destacam devido à sua versatilidade e fiabilidade são: *EnergyPlus*, TRNSYS e ESP-r [19].

EnergyPlus

O *EnergyPlus* é possivelmente o mais potente programa de simulação dinâmica de edifícios [18, 19, 20] e foi desenvolvido pelo Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos. Este tem como principal desvantagem o facto de não ter uma interface gráfica de fácil utilização, tendo-se de recorrer a outros programas para a modelação gráfica.

Castell et al. [18] compararam os principais modelos com a capacidade de simular o efeito dos PCM em edifícios. No caso concreto do *EnergyPlus*, os resultados experimentais e os simulados convergem quando o fenómeno das infiltrações de ar é ignorado, considerando este aspeto essa convergência não se verifica. Os principais problemas prendem-se com o facto de as simulações realizadas não reproduzirem da forma mais correta o efeito do PCM no comportamento térmico dos cubículos testados. O estudo aponta como possível origem destes erros a incapacidade do modelo em não admitir a introdução de dados climáticos experimentais e da modificação de parâmetros como as infiltrações.

Tetlow et al. [21] simularam a incorporação de PCM microencapsulados no isolamento de paredes interiores em habitações antigas no Reino Unido, apontando o *EnergyPlus*

como a ferramenta mais potente com a capacidade de simular componentes com PCM.

Shretsha et al. [22] avaliaram o modelo de impregnação de PCM em materiais isolantes do *EnergyPlus*. Baseando-se na comparação com dados experimentais, chegaram a um erro de 9% nas simulações efetuadas.

Tardieu et al. [23] compararam testes realizados em cubículos com as simulações efetuadas em *EnergyPlus*, obtendo resultados convergentes. Concluíram também que placas de gesso cartonado com PCM como paredes interiores aumentam satisfatoriamente a inércia térmica, levando a uma redução de até 4 °C da oscilação da temperatura interior no verão. O cubículo de teste cumpriu também com os requisitos de conforto térmico.

Mazo et al. [24] modelaram e validaram um modelo em *EnergyPlus* desenvolvido para avaliar o comportamento de pavimentos radiantes com PCM articulado com uma bomba de calor. Os resultados demonstraram a viabilidade da simulação, uma vez que o erro entre o caso experimental e o simulado é diminuto, pois a diferença média dos perfis de temperaturas é de menos de 0,3 °C e no cálculo das cargas térmicas ideais a diferença é de 1%.

Tabares-Velasco et al. [25] testaram o modelo da versão 7.1 do *EnergyPlus*, fazendo a sua verificação e validação através de uma metodologia semelhante à da norma ASHRAE Standard 140 [26] [25], esta baseia-se no cruzamento de dados provenientes da verificação analítica, de testes comparativos e da validação experimental. O modelo validado foi incluído na versão 8 e apresenta como principais vantagens um tempo de processamento inferior e admite a variação da condutividade térmica do PCM com a temperatura. Ainda assim, o estudo aponta algumas possíveis limitações à utilização desta versão do modelo:

- Os incrementos de tempo de simulação devem-se manter abaixo dos três minutos, limitando a velocidade das simulações;
- Para simulações horárias realistas é necessário reduzir a distância entre nós (para cerca de um terço do valor pré-definido), ao contrário das simulações mensais e anuais;
- Para PCM com uma histerese considerável o modelo pode perder precisão, principalmente para materiais de temperaturas de transição extremas.

TRNSYS

O TRNSYS é um *software* de simulação de sistemas transientes com várias vertentes, sendo uma delas a simulação energética de edifícios (TRNBuild/Type 56 [27]), tendo sido desenvolvidos ao longo dos últimos anos alguns modelos que permitem a incorporação de PCM na simulação dinâmica.

Ibáñez et al. [27] sugerem uma metodologia simples de forma a simular o efeito de PCM no TRNSYS 16, usando a capacidade do modelo Type 56 de simular camadas radiativas de aquecimento/arrefecimento, tendo apenas o objetivo de avaliar o impacto desta aplicação no balanço energético global do edifício e não dos processos de transferência de calor envolvidos no interior dos materiais. No fundo, esta camada funcionaria como bateria de aquecimento/arrefecimento, sendo uma analogia ao funcionamento da tecnologia PCM e os seus cálculos feitos à parte do *software*. Este método obteve resultados satisfatórios, podendo ser útil quanto à escolha da temperatura de transição ótima e do tipo de PCM a utilizar.

Ahmad et al. [28] conceberam uma placa de reboco diferente e o respetivo modelo TRNSYS Type 101, validando experimentalmente o caso. Exigente do ponto de vista da simulação numérica devido ao elevado número de nós considerados no modelo, este revelou uma concordância razoável com os resultados experimentais.

Schranzhofer et al. [29] propõem um método de simulação de PCM para o TRNSYS 16, capaz de analisar o comportamento de PCM microencapsulados e de diversas formas geométricas, através da articulação do modelo de cálculo de armazenamento de calor via PCM (Type 240) e do modelo relativo à integração de PCM em paredes (Type 241). A comparação entre os dados experimentais e simulados permitiu validar o modelo Type 240, ao contrário do Type 241 que devido à falta de dados experimentais não foi validado. Contudo, a temperatura operativa teve o comportamento esperado, tendo os picos de temperatura sido reduzidos consideravelmente com a aplicação de uma placa de gesso cartonado com material mudança de fase.

Kuznik et al. [30] desenvolveram um novo modelo (Type 260) para a simulação de paredes exteriores com PCM. Os resultados obtidos demonstram a fiabilidade do modelo obtendo uma diferença média entre as temperaturas de ar interior experimentais e simuladas de 0,3 °C. Mesmo com a concordância entre os valores experimentais e numéricos, uma fraqueza apontada é o facto de o modelo não considerar a mudança de fase na microcápsula, isto é, a variação dos coeficientes de transferência de calor de condução e de convecção, especialmente no momento da mudança de fase.

ESP-r

Desenvolvido na Universidade de Strathclyde, o ESP-r é um *software* opensource de simulação dinâmica energética de edifícios. Tal como Almeida et al. [31] expõem, o programa divide o problema em volumes de controlo, obtendo para cada um as várias equações de conservação (de massa, de energia, etc), integrando condições climatéricas, sombreamentos, ganhos, sistemas de climatização, entre outros. O ESP-r reporta o correto efeito dos PCM, considerando parâmetros como a condutividade térmica, calor específico ou energia armazenada variáveis. Almeida et. al. estudaram a aplicação de uma parede com mais que uma camada de PCM que, confrontando com o caso mais comum de apenas uma camada, verificou ser uma solução mais eficaz do ponto de vista térmico [31].

Fernandes e Costa [32] recorreram ao ESP-r para analisar o efeito da incorporação de PCM no tijolo furado em habitações típicas portuguesas melhorando o conforto térmico e obtendo poupanças no consumo energético.

Castell et. al [18] identificaram problemas na validação experimental de um modelo em ESP-r. O estudo refere que o *software* é pouco flexível na edição de parâmetros como as infiltrações, apontando este fator como a razão pela qual os resultados experimentais não coincidem com os resultados da simulação computacional.

Hoes et al. [33] fizeram uma abordagem diferente à incorporação de PCM em soluções construtivas, combinando os benefícios de edifícios com alta e baixa inércia térmica, recorrendo ao ESP-r. Este conceito híbrido de armazenamento térmico aumenta a adaptabilidade do edifício às estações de aquecimento e arrefecimento, sendo que as simulações efetuadas preveem uma diminuição máxima do consumo energético de 35%, relativamente a um edifício de elevada inércia térmica.

Heim [34] realizou um estudo acerca do efeito anual do aproveitamento dos ganhos

solares em alguns materiais. As simulações efetuadas no ESP-r basearam-se em dois casos distintos, com uma elevada percentagem de envidraçado e com ventilação natural. No primeiro recorreu-se a placas de gesso cartonado com PCM impregnado em paredes interiores e no segundo foi incluído nas paredes exteriores um material isolante com PCM. Concluiu-se que, para a primeira situação, espessuras mais reduzidas levam a um processo mais continuado, isto é, armazenar calor o tempo suficiente de forma a libertá-lo à noite. Já para o caso da simulação das paredes exteriores interessam espessuras de PCM mais pequenas mas com uma capacidade de armazenar calor latente superior.

1.3.3 Síntese

A literatura consultada permite validar as potencialidades da aplicação de soluções construtivas com PCM, isto é, a sua adequabilidade relativamente à regulação do comportamento térmico de edifícios, reduções no consumo energético e melhoria do conforto. As principais conclusões resultantes da revisão bibliográfica são:

Implicações nos consumos e conforto térmico

Na sua generalidade, os estudos consultados revelam a utilidade da inclusão de PCM na envolvente de edifícios, permitindo uma maior racionalização do consumo energético e a melhoria do conforto térmico:

- É possível reduzir os consumos energéticos relativos ao aquecimento e arrefecimento de edifícios (tendo em conta os requisitos de conforto térmico), essencialmente devido à diminuição do impacto das cargas térmicas exteriores na estação de arrefecimento;
- Estabilização das temperaturas interiores, reduzindo o tempo de operação de eventuais sistemas de climatização ativos (e consequentemente o seu consumo);
- Os PCM mostram ser úteis na medida em que aumentam consideravelmente a inércia térmica dos materiais de construção, o que faz com que a impregnação de PCM possa ser especialmente útil na construção leve (caracterizada pela baixa inércia térmica). Isto leva a concluir que o gesso cartonado é particularmente atrativo por ser um material predominante neste tipo de construção, para além de ser de fácil implementação;
- A otimização do desempenho de edifícios com PCM em ambas as estações é um assunto que ainda carece de desenvolvimentos. Ainda assim, estudos apontam no sentido de uma determinada aplicação para além de diminuir os ganhos solares no verão, permite reduzir as perdas de calor para o exterior no inverno. Por outro lado, também é conhecida a utilização de PCM com o intuito de tornar um certo piso radiante, de forma a combater o arrefecimento noturno em ambas as estações. Contudo, esta aplicação pode não ter a eficácia desejada na estação de arrefecimento;
- A compatibilização com sistemas de climatização é fundamental e passa essencialmente por recorrer a estratégias que visam descarregar a carga térmica dos PCM nomeadamente através de sistemas de ventilação mecânica e natural.

Importância da localização de soluções construtivas com PCM

A aplicação de materiais com PCM revelou ser viável apenas para localizações específicas, em que o edifício beneficiasse de cargas solares durante grande parte do dia, aumentando a sua utilidade quanto ao armazenamento de calor latente, tais como:

- Paredes exteriores orientadas a sul, este e oeste, sendo que as paredes orientadas a sul se encontram expostas à radiação solar durante todo o dia (para o hemisfério norte);
- Pavimentos interiores em compartimentos com uma alta percentagem de envidraçado;
- Sótãos e lajes de cobertura;
- Incorporados em envidraçados;

Simulação dinâmica

Existem muitos programas de simulação dinâmica de edifícios que permitem a inclusão de PCM. Contudo, com a revisão bibliográfica efetuada pode-se concluir que o *software* mais potente é o *EnergyPlus*. Apesar deste ser um programa com uma interface gráfica de difícil utilização, permite que se recorra a programas de modelação gráfica ou de pré-processamento. Os três programas analisados, *EnergyPlus*, TRNSYS e ESP-r, demonstram (na sua maioria) convergência entre resultados experimentais e simulados, ainda assim os dois últimos apresentam limitações comparativamente ao *EnergyPlus*. O TRNSYS é exigente do ponto de vista numérico e pouco versátil na criação de soluções construtivas com PCM pois exige a criação de modelos (Types) para cada uma. Por sua vez, o ESP-r apesar de simular corretamente o comportamento dos PCM e de se encontrar bem referenciado e validado em diversos estudos, também é-lhe apontado problemas na definição e visualização do efeito de alguns parâmetros. Desta forma, a opção recai sobre o *EnergyPlus* como motor de cálculo, recorrendo ao programa *DesignBuilder* para a modelação e pré-processamento do modelo.

1.4 Contributo da dissertação

Este trabalho tem como objetivo contribuir para o estudo da aplicação de PCM na envolvente de edifícios através dos seguintes aspetos:

- Estudar a aplicação destas soluções no panorama português;
- Avaliar a utilidade da integração de PCM na estação de arrefecimento e aquecimento;
- Verificar possíveis reduções no consumo energético através da redução das necessidades de climatização;
- Estudar a influência de alguns parâmetros construtivos no comportamento térmico da envolvente;

- Avaliar a necessidade de recorrer a estratégias de ventilação de forma a otimizar o desempenho térmico dos PCM.

Com isto, pretende-se que esta dissertação auxilie e incentive os projetistas a recorrer a soluções construtivas com PCM de forma a melhorar o desempenho energético de novos edifícios em Portugal.

1.5 Estrutura do documento

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, efetuando uma síntese em cada um, excetuando o capítulo introdutório e de conclusão.

No Capítulo 1 começa-se por enquadrar o estudo, definir objetivos e contributos, bem como apresentar a revisão bibliográfica efetuada. Esta, por sua vez, é subdividida em duas partes: inicialmente são apresentados diversos estudos que demonstram as potencialidades e limitações da aplicação de PCM na envolvente de edifícios, de seguida são apresentados trabalhos que pretendem analisar e verificar a capacidade dos principais *softwares* que permitem incluir estes materiais na simulação dinâmica de edifícios. No final deste capítulo é feita uma síntese e são tiradas as principais conclusões da revisão bibliográfica efetuada.

O Capítulo 2 pretende apresentar os fundamentos dos materiais mudança de fase, os vários tipos existentes, principais propriedades, como são estes incorporados em soluções construtivas e são também indicadas outras aplicações de PCM em edifícios.

No Capítulo 3 expõe-se os princípios da transferência de calor em edifícios, seguidamente apresentam-se duas metodologias de análise do comportamento térmico de edifícios: a análise estática (segundo o RCCTE) e a análise dinâmica (recorrendo às ferramentas de simulação dinâmica selecionadas para o estudo), com especial enfoque para as limitações e benefícios de cada uma no âmbito dos materiais mudança de fase.

No Capítulo 4 é caracterizado o modelo de simulação, são definidos os pressupostos e considerações gerais e o tipo de abordagem adotado é detalhadamente exposto.

No Capítulo 5 é feita a apresentação e análise de resultados.

Finalmente, no Capítulo 6 são expostas as principais conclusões da dissertação, sendo também indicadas algumas sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

Materiais mudança de fase

Os materiais mudança de fase (PCM) caracterizam-se pela sua elevada capacidade de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, permitindo um armazenamento de calor por unidade de volume superior aos materiais aplicados em soluções construtivas convencionais. Podem ser definidos, de uma forma simplificada, como materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperaturas através da absorção ou libertação de energia, em que durante este processo endotérmico a temperatura do material mantém-se aproximadamente constante. É possível verificar estes fenómenos na Figura 2.1, em que numa fase inicial (estado sólido) o PCM absorve energia na forma de calor sensível, chegando à temperatura de fusão este passa absorver calor latente. Uma vez atingido o limite da capacidade de armazenamento de calor latente este funde por completo e passa armazenar apenas calor sensível novamente. As transições de fase sólido-líquido são as mais comuns, devido às pequenas variações de volume no processo [3].

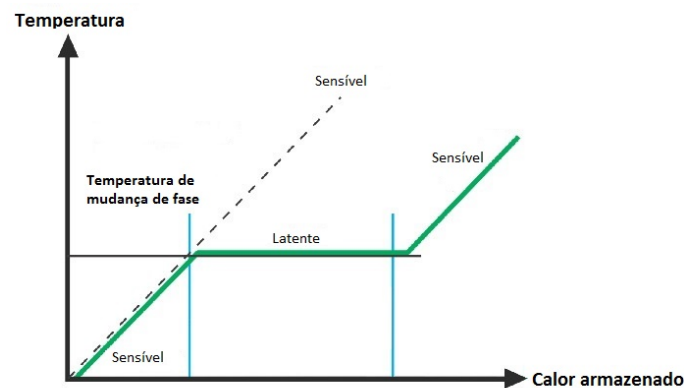


Figura 2.1: Comportamento dos PCM em termos de calor sensível e latente armazenado, adaptado de [35]

Neste capítulo pretende-se apresentar os diversos tipos de PCM existentes, indicar as suas principais propriedades (dando ênfase à aplicação em soluções construtivas) e as técnicas de incorporação em materiais de construção. Finalmente, são também apresentadas outras aplicações que recorrem a estes materiais.

2.1 Classificação

Os PCM agrupam-se em três grupos principais, consoante a sua composição química: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. Os compostos orgânicos dividem-se em parafínicos e não-parafínicos, enquanto os compostos inorgânicos repartem-se em sais hidratados e metálicos. Uma mistura eutética (ou eutéticos inorgânicos) é composta por dois ou mais componentes que fundem e cristalizam de forma consonante, formando uma mistura de cristais compostos. Cada grupo é caracterizado pela sua gama de temperaturas e entalpias de fusão (Figura 2.2).

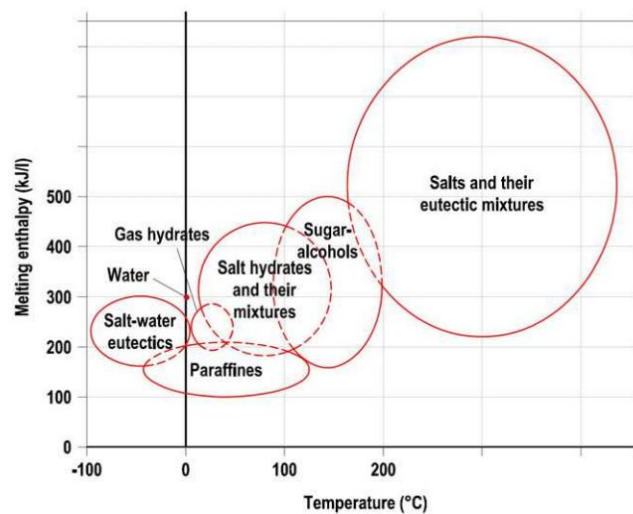


Figura 2.2: Temperaturas e entalpias de fusão para os diferentes grupos de PCM [3]

2.1.1 PCM orgânicos

Estes compostos têm como principais características o facto de serem geralmente estáveis quimicamente, apresentarem calores latentes de fusão elevados, não são afetados por sub-arrefecimento e não são tóxicos nem corrosivos. Os PCM orgânicos podem ser parafinas e não-parafinas.

As ceras de parafina comerciais (tipo mais usual) apresentam uma razoável capacidade de armazenamento de calor, na ordem dos 120-210 kJ/kg de entalpia de fusão, sendo económicos [3]. As parafinas encontram-se disponíveis numa vasta gama de temperatura de fusão aproximadamente entre 20-70 $^{\circ}C$. A caracterização efetuada das ceras de parafina recorrendo a calorímetros diferenciais (DSC - Differential Scanning Calorimetry) demonstrou que a performance térmica destas não se degrada significativamente quando sujeitas a ciclos térmicos numerosos [3]. Apesar destas características, as parafinas apresentam condutividades térmicas baixas, na ordem dos 0.2 $W/(m.K)$, e variação de volume considerável na mudança de fase [36]. Para contornar esta problemática, utilizam-se fibras ou matrizes metálicas de forma a aumentar a condutividade térmica bem como recipientes poliméricos para ultrapassar as referidas variações de volume. Contudo, a aplicação de parafinas em edifícios continua limitada pela dificuldade de implementação das soluções sugeridas em materiais de construção.

Os PCM orgânicos não-parafrínicos incluem uma vasta gama de materiais como álcoois, glicóis ou ácidos gordos. Estes materiais apresentam boas características no que à fusão e solidificação diz respeito, contudo são cerca de três vezes mais caros que os parafrínicos [37]. Os materiais orgânicos não parafrínicos mais comuns são os ácidos gordos, que permitem alcançar temperaturas de fusão e solidificação em gamas relativamente baixas ($16-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $17-64\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente), elevado calor latente de fusão (na ordem dos $155-180\text{ kJ/kg}$) e baixa variação de volume na mudança de fase [37]. Ainda assim, existem poucos tipos com uma mudança de fase que se aproxime das temperaturas usuais de conforto térmico (aproximadamente $21\text{ }^{\circ}\text{C}$, embora este valor varie consoante o valor de referência para cada país) [3].

2.1.2 PCM inorgânicos

De uma forma geral, os compostos inorgânicos apresentam valores elevados de calor latente de fusão, boa condutividade térmica, são económicos e com a contrapartida de serem compostos mais inflamáveis. Ainda assim, são suscetíveis à decomposição, corrosivos em relação à maioria dos metais e podem apresentar sub-arrefecimento, o que afeta significativamente as suas propriedades de mudança de fase. A maioria dos PCM inorgânicos são sais hidratados, tendo características atrativas para o armazenamento de calor, contudo estas propriedades são difíceis de manter com o ciclo térmico.

2.1.3 Misturas eutécticas

As misturas eutécticas baseiam-se na combinação de dois ou mais compostos orgânicos, inorgânicos ou ambos, podendo assim apresentar temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades do problema do que os compostos apresentariam por si só. A proporção de cada composto depende do ponto de fusão desejado, esta apresenta-se como a grande vantagem destas misturas. Ainda assim, as suas propriedades térmicas e físicas podem tornar-se difíceis de caracterizar e o seu custo chega, em alguns casos, a ser o triplo dos compostos orgânicos ou inorgânicos [3]. As misturas eutécticas podem ser divididas em três grupos: eutécticos orgânicos-orgânicos, inorgânicos-inorgânicos e inorgânicos-orgânicos. Este tipo de PCM apresenta geralmente temperaturas de fusão entre 18 e $51\text{ }^{\circ}\text{C}$, de solidificação desde 16 a $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ e calor latente de fusão na ordem dos $120-160\text{ kJ/kg}$. Um exemplo de possível aplicação em edifícios é o eutéctico orgânico cáprico-láurico que apresenta características adequadas para o armazenamento da radiação solar com ponto de fusão situado nos $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura de solidificação de $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ e calor latente de fusão 120 kJ/kg [3].

2.2 Propriedades

Os PCM devem possuir diversas propriedades para poderem ser efetivamente utilizados como armazenadores de energia, sobretudo termo-físicas e químicas. O material é escolhido mediante as suas propriedades, pois estas definem as condições de operação em que o material pode ser utilizado. Para aplicações em soluções construtivas, é essencial que o PCM escolhido possua [3]:

- Uma temperatura de transição de fase dentro da gama de temperaturas operativas. Esta temperatura irá depender essencialmente das condições climáticas e da

exposição do edifício às cargas solares;

- Reduzida variação de volume na mudança de fase, pois uma variação elevada pode levar a alterações na capacidade de armazenamento para um número elevado de ciclos e a problemas na contenção do material, dificultando a incorporação em materiais de construção ou estruturas;
- Elevada condutividade térmica tanto no estado sólido como no estado líquido, promovendo assim a transferência de calor. É um problema recorrente na utilização de PCM: na estação de aquecimento o PCM absorve o calor proveniente do exterior, reduzindo as cargas térmicas solares. Por outro lado, com a passagem do estado sólido para líquido a sua condutividade térmica decresce, passando a funcionar como isolante térmico o que faz com que possam aumentar as necessidades de arrefecimento no interior;
- Elevado calor latente de fusão, permitindo armazenar uma maior quantidade de calor através do mínimo de PCM possível;
- O material mudança de fase tem de ser quimicamente estável com o material onde está incorporado, para além de manter o seu comportamento para um elevado número de ciclos, não é desejável que seja tóxico ou facilmente inflamável;
- Do ponto de vista cinético, o PCM deverá ter uma velocidade de cristalização elevada, evitando assim o sub-arrefecimento (*supercooling*) da fase líquida. Este acontecimento baseia-se na diminuição da temperatura do líquido para temperaturas inferiores ao ponto de solidificação sem este passar ao estado sólido, o que poderá alterar propriedades do material, nomeadamente a sua temperatura de transição.

2.3 Incorporação de PCM em soluções construtivas

2.3.1 Microencapsulamento

A técnica de microencapsulamento baseia-se no envolvimento de pequenas partículas de um composto líquido ou sólido (núcleo) por uma camada de material sendo este, na generalidade dos casos, polimérico. Os materiais poliméricos mais usuais são o poliuretano, PVC, poliestireno e a poliureia [38].

Com o microencapsulamento de PCM, pretende-se que este material se mantenha no interior da microcápsula em condições operativas normais, promovendo a interação com o ambiente envolvente. A escolha da técnica e do material para o encapsulamento é importante na medida em que tem de ser química, física e mecanicamente estável com o meio ou superfícies com que o PCM vai interagir. O método de microencapsulamento mais usual é a dispersão de "óleo em água" [39]. Este baseia-se na dispersão de gotas de PCM numa solução aquosa em que a formação de paredes de polímero em torno das gotas de PCM suspensas na solução ocorre recorrendo a técnicas de polimerização *in situ* como a coacervação ou a policondensação interfacial. Estas técnicas permitem produzir microcápsulas de PCM de tamanho reduzido, proporcionando uma troca de calor rápida com a envolvente [38], como é pretendido. A título de exemplo, a Figura 2.3 ilustra a aplicação de PCM microencapsulado impregnado numa placa de gesso cartonado

ThermalCORE™ da National Gypsum, aqui é possível observar a microcápsula de PCM entre os cristais de gesso.

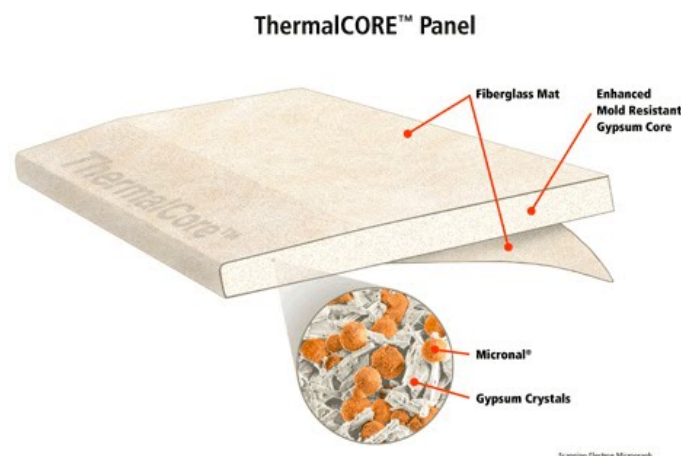


Figura 2.3: Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM - ThermalCORE™, National Gypsum [40]

2.3.2 Macroencapsulamento

O macroencapsulamento consiste na integração do PCM em recipientes, usualmente tubos ou bolsas dispostas em matriz, em placas ou painéis. Neste caso a incorporação em soluções construtivas é feita colocando o PCM como camada destas, em vez de se encontrar presente no interior de um dos materiais [41]. Desta forma, eventuais problemas de fugas devido à fusão do material ou consequências nas propriedades mecânicas do material de construção são evitados. Ainda assim, a macroencapsulação pode apresentar algumas irregularidades na condutividade térmica, uma vez que tende a criar depósitos na cápsula levando à falta de fusão do PCM aí presente [42]. A aplicação de PCM macroencapsulados é a solução mais comum [42] no presente, embora muitos estudos apontem no sentido da utilização de soluções envolvendo microencapsulação [3]. Na Figura 2.4(a) encontra-se a solução comercial BioPCM™ e na Figura 2.4(b) o exemplo de uma aplicação da mesma solução, neste caso num pavimento interior em madeira.

2.3.3 Imersão e incorporação direta

A imersão e a incorporação direta são os métodos mais tradicionais de incluir PCM em materiais de construção, tendo características semelhantes [44]. A imersão consiste em mergulhar o material em PCM fundido, fazendo com que os poros do material absorvam o PCM por ação capilar. Já a incorporação direta é o método mais simples de incorporação de PCM em materiais de construção, este processo baseia-se em espalhar o PCM (em pó ou em estado líquido) sob o próprio material, sendo absorvido pelo mesmo. Contudo, estes métodos têm como problemas possíveis fugas ou até incompatibilidade com alguns materiais de construção que não os convencionais [44].

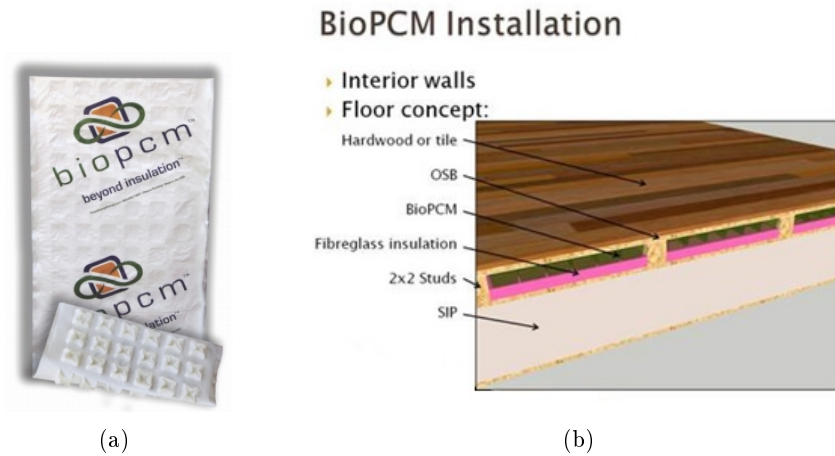


Figura 2.4: (a) Placas BioPCM™; (b) Exemplo de aplicação das soluções BioPCM™[43]

2.4 Outras aplicações

2.4.1 Sistemas solares para aquecimento de água

A utilização de PCM em sistemas solares para aquecimento de água (Figura 2.5) é das aplicações mais estudadas atualmente não só pela poupança de energia no aquecimento das águas sanitárias, mas também devido à facilidade de instalação e manutenção [45]. Durante o dia, o PCM funde e absorve energia em forma de calor latente, ao final do dia com a solidificação do PCM este calor é libertado, sendo a água fria aquecida. O principal problema desta aplicação prende-se com a fraca transferência de calor entre a água e o PCM. Para melhorar este fator os estudos centram-se no tipo de PCM a utilizar, sendo que apontam para PCM de sais hidratados como os mais eficientes [46]. Outra solução apontada é recorrendo a um fluxo de água em torno do PCM (convecção forçada), obrigando a uma redefinição do sistema mas desta forma é possível aumentar o coeficiente de transferência de calor entre o PCM e a água de forma significativa [47].

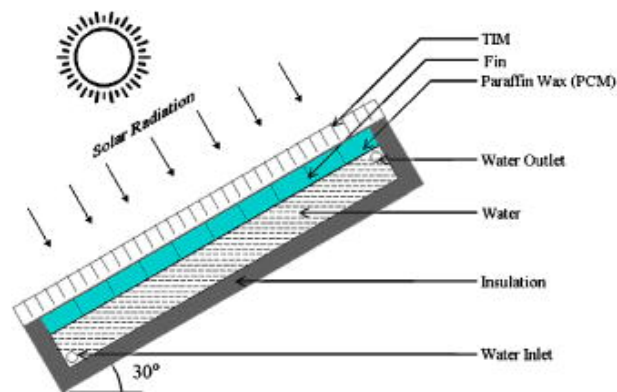


Figura 2.5: Exemplo de sistema solar para aquecimento de água com recurso a PCM [48]

2.4.2 Sistemas solares para aquecimento do ar

A aplicação de sistemas solares no aquecimento do ar interior tem sido amplamente estudada de forma a reduzir o consumo energético relativo ao aquecimento. A integração de PCM nestes sistemas (Figura 2.6) é feita com o objetivo de melhorar não só a acumulação mas também a libertação de calor, sendo que o principal problema destas soluções prende-se com a pouca eficácia em transferir o calor do sistema para o compartimento [46]. Estudos efetuados [46] referem que o PCM deve ser selecionado tendo em conta a sua temperatura de fusão em vez da capacidade de armazenamento de calor latente, sendo este fator compensado através de uma elevada área de superfície de PCM.

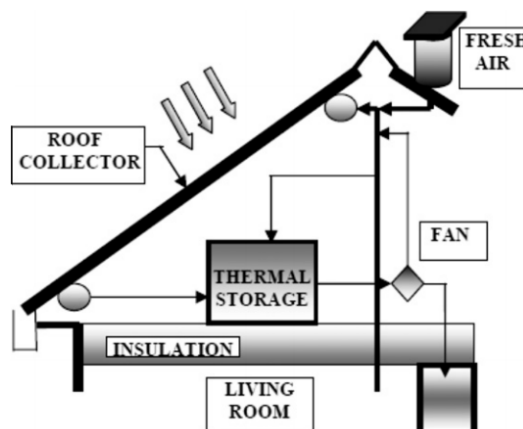


Figura 2.6: Exemplo de sistema solar para aquecimento do ar com recurso a PCM [47, 49]

2.4.3 Parede trombe

Tradicionalmente, a parede trombe é um elemento passivo de aproveitamento indireto da energia solar. O funcionamento deste sistema (Figura 2.7) baseia-se na colocação de uma parede entre um envidraçado de grande área (para aumentar os ganhos solares) e o compartimento interior, é neste espaço de ar que ocorre o fenómeno de efeito de estufa

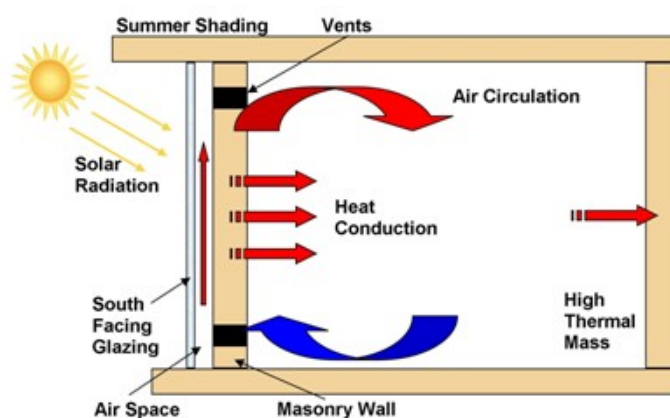


Figura 2.7: Esquema de funcionamento de uma parede trombe [50]

e que, conforme as necessidades do espaço, é ventilado para o interior ou utilizado para extrair o ar quente sendo posteriormente levado para o exterior através de ventilação natural [45].

Sendo a parede trombe um sistema de armazenamento de calor sensível, a aplicação de PCM confere a este elemento a capacidade de reter calor latente, aumentando a capacidade global de armazenamento de calor por unidade de área da parede. No âmbito das paredes trombe, os PCM têm vindo a ser apontados como alternativas a alvenarias mais pesadas, reduzindo a utilização de materiais convencionais para se obter uma performance térmica equivalente [47].

2.5 Síntese do capítulo

Neste segundo capítulo efetuou-se uma introdução teórica aos materiais mudança de fase, permitindo compreender os seus fundamentos e respetivas classificações e propriedades. Desta forma é possível perceber quais as potencialidades destes materiais mas também as suas exigências e limitações não só do ponto de vista térmico mas também químico, cinético ou de incorporação em materiais de construção.

Numa segunda fase são sumariamente descritos os diferentes processos de incorporação de PCM em soluções construtivas, apresentando as técnicas de fabrico e impregnação em materiais mais comuns, bem como as suas limitações e vantagens. Daqui é possível retirar que as técnicas existentes carecem de melhoria, inclusive é referido que os métodos mais convencionais como a imersão e a incorporação direta revelam claras limitações no que diz respeito a fugas e à incompatibilidade com alguns materiais. No que respeita aos métodos de encapsulamento de PCM a microencapsulação apresenta vantagens do ponto de vista térmico, no entanto influenciam em demasia a resistência de materiais como as placas de gesso cartonado (aplicação mais comum). Já o macroencapsulamento pode apresentar uma transferência de calor deficiente levando à falta de fusão do PCM em determinadas circunstâncias, criando depósito. Na presente dissertação, a solução utilizada é a macroencapsulação, essencialmente devido ao *software* utilizado conter apenas as placas BioPCM™ na sua base de dados.

Finalmente, são apresentadas outras aplicações de PCM em edifícios, aqui verificam-se as vantagens da utilização destes materiais em sistemas solares para aquecimento de água e ar, bem como a implementação de PCM numa parede trombe.

Capítulo 3

Análise do comportamento térmico de edifícios

Para analisar ou prever o comportamento térmico de edifícios, é necessário compreender os princípios de transferência de calor bem como a existência de determinados fenómenos envolvidos. Neste capítulo serão inicialmente apresentados os mecanismos clássicos de transferência de calor e a forma como estes interagem com a envolvente, expondo-se de seguida o modo como os PCM influenciam os ganhos internos e a inércia térmica dos edifícios. Finalmente, serão expostos dois tipos de análise do comportamento térmico de edifícios: as análises estática e dinâmica. Estas serão confrontadas em termos da sua adequabilidade à análise de edifícios com componentes integrando PCM.

3.1 Transferência de calor em edifícios

Como em qualquer outro sistema, os ganhos térmicos em edifícios podem ser ou não desejáveis, no caso dos edifícios estes dependem da altura do ano e das condições exteriores. O balanço térmico de edifícios encontra-se esquematizado na Figura 3.1 e considera um conjunto de fatores, tais como:

- Ganhos internos (Q_i) - energia gerada no interior do edifício pela atividade humana, equipamentos e iluminação artificial;
- Trocas de calor devido às renovações de ar (Q_V) - sistemas de ventilação e infiltrações;
- Ganhos solares (Q_S) - aquecimento do ar interior e da massa térmica do edifício pela radiação solar;
- Trocas de calor por condução através da envolvente (Q_T) - perdas ou ganhos térmicos pelas paredes, cobertura, envidraçados, solo ou pontes térmicas.

No entanto, em edifícios com mais que uma zona e com temperaturas diferentes dá-se também uma troca de calor entre os compartimentos, podendo cada um ter diferentes exigências térmicas.

A equação geral do balanço térmico de edifícios em regime estacionário encontra-se representada na equação 3.1. De notar que, dependendo das condições exteriores e

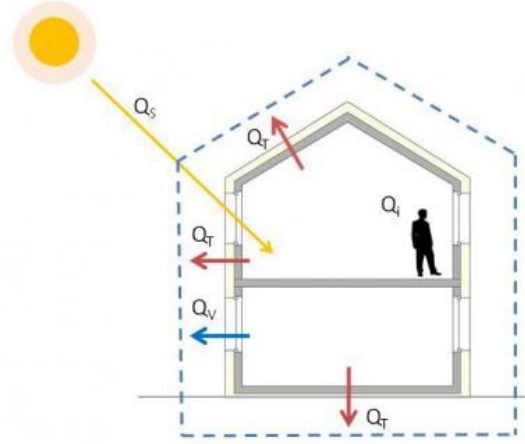


Figura 3.1: Representação das trocas de calor envolvidas no balanço térmico de edifícios [51]

interiores, as trocas de calor por condução e devido à ventilação e infiltrações do espaço podem assumir valores positivos ou negativos.

$$Q_i + Q_S \pm Q_T \pm Q_V = 0 \quad (3.1)$$

Considerando a incorporação de PCM na envolvente, é exigido que se proceda de uma forma distinta relativamente ao balanço térmico. A inclusão destes materiais exige que se aborde o balanço em regime transitório (equação 3.2), incluindo uma parcela relativa à transferência de calor latente devido à presença de PCM (Q_{PCM}).

$$Q_i + Q_S \pm Q_T \pm Q_V \pm Q_{PCM} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3.2)$$

$$Q_{PCM} = \rho \cdot V \cdot \frac{dh}{dt} \quad (3.3)$$

3.1.1 Condução

A condução é o mecanismo responsável pela transferência de calor ao longo de um elemento sólido, sendo, no âmbito da térmica de edifícios, a responsável pelo fluxo de calor entre as superfícies exterior e interior de uma determinada solução construtiva. Para efeitos de cálculo, este fluxo é comumente considerado unidimensional e obtém-se através da Lei de Fourier (equação 3.4), representando-se em regime estacionário pela equação 3.5.

$$Q_{cond} = k \cdot A_s \cdot \frac{dT}{dx} \quad (3.4)$$

$$Q_{cond} = k \cdot A_s \cdot \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad (3.5)$$

No caso da condução, os parâmetros mais importantes são a condutibilidade térmica (k) e a espessura de cada material (Δx), sendo estes parâmetros alterados conforme as

exigências térmicas do espaço interior, em especial nos materiais isolantes. É de salientar que no caso de uma descontinuidade no elemento construtivo (vigas, por exemplo), devem-se considerar os fluxos de calor noutras direções bem como a existência de pontes térmicas.

3.1.2 Convecção

A convecção é o mecanismo de transferência de calor originado pelo movimento de um fluido, sendo este líquido ou gasoso. O movimento do fluido pode ser natural ou forçado.

No caso da convecção natural, o movimento dá-se devido à diferença de temperaturas e densidades, por ser menos denso, o fluido com a temperatura mais elevada sobe relativamente ao fluido com a temperatura mais reduzida, devido às forças de impulsão criadas pelos ditos diferenciais.

Relativamente à convecção forçada, o movimento é originado por um agente externo como o vento ou um equipamento, sendo esta por norma a forma mais eficiente de transferir calor por convecção, possuindo um coeficiente de transferência de calor de convecção (h_{conv}) superior ao da convecção natural.

A convecção é particularmente útil para fornecer ou remover calor de uma superfície sólida de uma forma mais eficiente. Para calcular o fluxo entre uma superfície sólida e um fluido, recorre-se à lei do arrefecimento de Newton (equação 3.6).

$$Q_{conv} = h_{conv} \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.6)$$

3.1.3 Radiação

Ao contrário dos mecanismos anteriores a radiação não necessita de um sólido ou fluido de transporte, propagando-se através de ondas eletromagnéticas o que faz com que se transfira também no vácuo. Outro fator diferenciador é que a transferência de calor por radiação é proporcional à quarta potência da temperatura, tornando-se de extrema importância em processos que envolvam temperaturas elevadas.

A radiação rege-se pela lei de Stefan-Boltzmann (expressão simplificada, equação 3.7), que traduz o poder emissivo de um corpo. A capacidade de uma determinada superfície emitir radiação é definida pelo valor da emissividade (ε), podendo tomar valores entre 0 (reflete toda a radiação) e 1 (corpo negro, absorve toda a radiação). Para o cálculo da troca de calor por radiação entre dois corpos recorre-se à equação 3.8.

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot T^4 \quad (3.7)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.8)$$

No caso dos edifícios, os fenómenos de radiação envolvidos são essencialmente solares. A radiação solar incide na superfície exterior do edifício, sendo uma parte transmitida para o interior por condução, outra absorvida pelos materiais e a restante refletida. Existe naturalmente troca de calor por radiação no interior do edifício, no entanto dadas as baixas temperaturas e emissividades da generalidade dos corpos emissores, apenas a radiação emitida pelos sistemas de iluminação assumem um papel relevante.

3.1.4 Inércia térmica

A inércia térmica é a capacidade de um edifício reagir às variações de temperatura, ou seja, representa a forma como este responde aos armazenamento e restituição do calor. O cálculo da inércia térmica (equação 3.9) é efetuado, para i elementos, através do quociente entre o somatório dos produtos das massas superficiais úteis (M_{si}) com a áreas da superfície (S_i) e a área útil de pavimento (A_p).

$$I_t = \frac{\sum M_{si} \cdot S_i}{A_p} \quad (3.9)$$

A inércia térmica de um edifício depende essencialmente da massa superficial dos seus elementos, as construções leves possuem uma inércia inferior a construções mais pesadas. O RCCTE define três classes de inércia térmica: fraca, média e forte. Um edifício com inércia forte, responde de uma forma mais lenta às mudanças de temperatura que um edifício de inércia fraca. Posto isto, a inércia influencia o comportamento térmico de edifícios no verão e no inverno de forma diferente. Na estação de arrefecimento a inércia define a capacidade do edifício absorver os picos de cargas solares, na estação de aquecimento a inércia regula os ganhos solares no interior.

Os PCM são muito interessantes na medida em que conferem uma inércia térmica aparente ao edifício, isto é, apesar de não entrarem no cálculo da inércia térmica de uma forma substancial, a sua capacidade de absorção de calor latente pode limitar quer a passagem de cargas solares para o interior (verão), quer a libertação de calor gerado no interior (inverno). Desta forma, a utilização de PCM é particularmente útil em construções leves [3], uma vez que passam a possuir uma inércia, embora aparente, extraordinária, melhorando o comportamento térmico do edifício em determinadas condições exteriores (depende dos tipos de PCM selecionados).

3.2 Análise estática (metodologia RCCTE)

A análise do tipo estática é baseada na metodologia sugerida pelo RCCTE para a previsão do comportamento térmico de edifícios, sugerindo que seja feita separadamente para a estação de aquecimento e arrefecimento.

A metodologia de análise baseia-se no cálculo das necessidades nominais de aquecimento (equação 3.10) e arrefecimento (equação 3.11) [52].

$$N_{IC} = \frac{Q_T + Q_V - Q_{gu}}{A_p} \quad (3.10)$$

$$N_{VC} = \frac{(1 - \eta_u) \cdot Q_{gu}}{A_p} \quad (3.11)$$

No cálculo das necessidades nominais é necessário saber os ganhos ou perdas de calor por condução através da envolvente (Q_T), que por sua vez são obtidos pela soma dos fluxos de calor que atravessam os elementos em contacto com o exterior, com zonas não climatizadas, com o solo e através de pontes térmicas.

As trocas de calor de elementos em contacto com o exterior (equação 3.12) são calculadas tendo em conta o coeficiente de transmissão térmica (equação 3.13) do elemento

em questão, que por sua vez é o inverso da soma das resistências superficiais interiores, exteriores e do somatório das resistências térmicas dos materiais da solução construtiva.

$$Q_{ext} = U \cdot A \cdot (T_{int} - T_{ext}) \quad (3.12)$$

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad (3.13)$$

O problema desta abordagem no âmbito da incorporação de PCM na envolvente é o facto de não considerar o fator dinâmico relativo à absorção e libertação de calor latente por parte dos PCM. Para além de não considerar as trocas de calor latente, a análise estática também não inclui a variação das propriedades termofísicas do PCM, que são significativas com a mudança de fase (Figura 3.2). Para efeitos de cálculo, mesmo se se considerar para cada propriedade um valor equivalente (como representado na Figura 3.2) pode-se estar a subvalorizar ou sobrevalorizar o efeito do PCM.

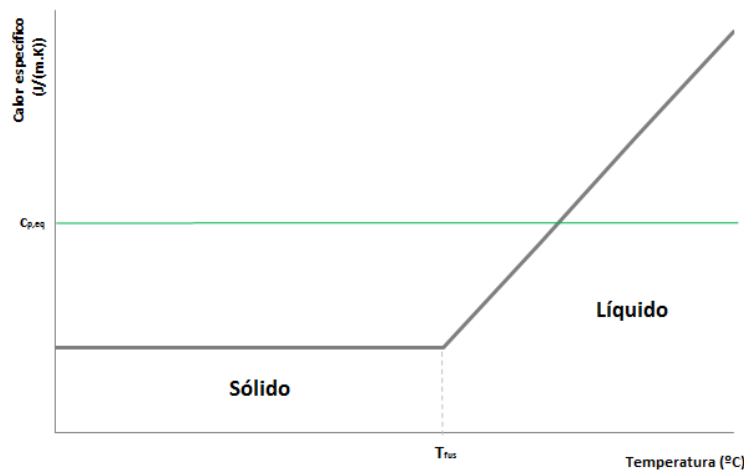


Figura 3.2: Exemplificação da mudança de comportamento do calor específico com a mudança de fase

3.3 Análise dinâmica (*DesignBuilder/EnergyPlus*)

Como já foi referido no capítulo introdutório, este trabalho recorre ao *software EnergyPlus* (v8.0) como motor de cálculo e ao *DesignBuilder* (v3.3.0.043 BETA) como programa de interface gráfica e pré-processamento.

O *EnergyPlus* é um programa de referência no que concerne à simulação dinâmica de edifícios e foi desenvolvido pelo Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos com o intuito de auxiliar projetistas, engenheiros e arquitetos no ante-projeto, permitindo prever o comportamento térmico de edifícios e verificar o efeito dos diferentes sistemas no mesmo de uma forma dinâmica. No entanto, recorre-se ao *DesignBuilder* como pré-processador e interface gráfica pois permite inserir, tratar e visualizar os dados ou resultados de uma forma mais simples e intuitiva.

O funcionamento do programa *EnergyPlus* baseia-se em efetuar simulações do balanço térmico e de massa para os volumes de controlo estabelecidos (zonas), sendo possível definir em cada um destes todos os parâmetros pretendidos. A Tabela 3.1 apresenta os dados de entrada (*inputs*) e os dados de saída (*outputs*) de uma simulação em *EnergyPlus*. De uma forma geral, é necessário introduzir no programa todos os detalhes relativos ao modelo de simulação, desde propriedades dos materiais, geometria, orientação, caracterização de envolventes, clima, entre outros. Para obter os *outputs*, o programa calcula a energia necessária para manter as condições interiores selecionadas pelo utilizador, baseando-se nos dados operativos definidos pelo mesmo.

Tabela 3.1: *Inputs* e *outputs* do *EnergyPlus* [53]

<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
Localização	Temperaturas interiores (para cada zona)
Dados climáticos	Temperatura exterior
Geometria e orientação	Fluxos de calor através da envolvente
Definição das zonas	Necessidades de consumo de aquecimento
Definição das envolventes	Necessidades de consumo de arrefecimento
Ganhos internos	
Dados operativos	
Sistemas AVAC	
Métodos de cálculo	
Período de simulação	

No que diz respeito à metodologia de cálculo, o *EnergyPlus* calcula o fluxo de calor que atravessa um determinado elemento opaco através da equação 3.14 [54]. Daqui é possível retirar que o fluxo que atravessa o dito elemento depende essencialmente da radiação solar incidente na superfície exterior, das temperaturas interiores (i) e exteriores (o), e de fatores de inércia térmica relativos às propriedades dos materiais do elemento (X e Y).

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (3.14)$$

Por sua vez, para calcular as temperaturas o *EnergyPlus* recorre à equação 3.15 [54].

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i^t + \dot{m}_{sys} C_p T_{supply}^t + \left(C_z \frac{T_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} \right)^{t-\delta t}}{\frac{C_z}{\delta t} + \left(\sum_{i=1}^{N_s} h_i A_i + \sum_{i=1}^{N_z} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C_p \right)} \quad (3.15)$$

Na Figura 3.3 encontra-se descrito todo o processo de simulação dinâmica, isto é, como o *EnergyPlus* e o *DesignBuilder* interagem. Numa primeira fase, são definidas as condições base do modelo de simulação para posteriormente serem pré-processadas no *DesignBuilder*, que cria um ficheiro de dados (IDF) para ser lido pelo *EnergyPlus*.

A incorporação de PCM na simulação dinâmica (Figura 3.4) passa pela aquisição de dados através de DSC (ou apenas consultando as especificações do material) e respetivo

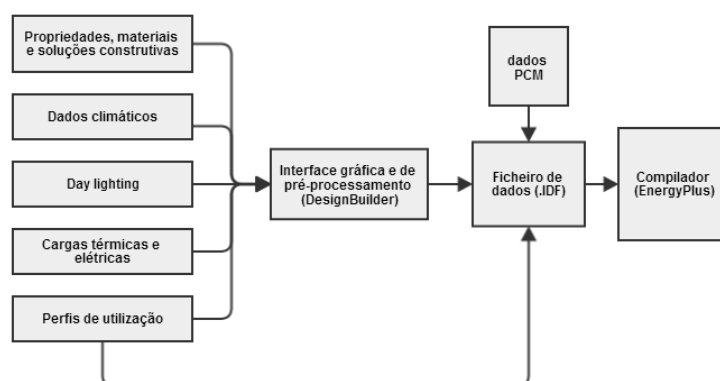


Figura 3.3: Descrição do processo de simulação dinâmica, adaptado de [55]

tratamento de dados, o que produz as curvas temperatura-entalpia que são os dados de entrada para o ficheiro de dados do *EnergyPlus*.

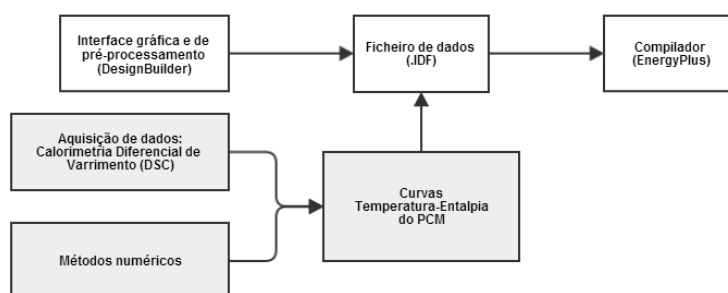


Figura 3.4: Descrição da integração de PCM no processo de simulação dinâmica, adaptado de [55]

3.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os fundamentos da transferência de calor em edifícios, através da exposição dos principais mecanismos de transferência de calor e da abordagem à importância da inércia térmica no comportamento térmico de edifícios, mais concretamente da influência dos PCM neste aspeto.

Seguidamente, foram confrontados os dois tipos de análise do comportamento térmico de edifícios: análise estática e análise dinâmica. A análise estática revela-se pouco adequada para edifícios com componentes integrando PCM, isto porque não consta do regulamento a possibilidade de considerar os processos de absorção e libertação de calor latente que caracterizam estes materiais. Por sua vez, a análise dinâmica é a metodologia mais correta uma vez que vai ao encontro das características destes materiais, sendo um método essencial na abordagem à inclusão de PCM em edifícios. Nesta parte também se descreve todo o processo de simulação dinâmica, como o *DesignBuilder* e o *EnergyPlus* interagem e como são os materiais integrados neste processo.

Capítulo 4

Metodologia de análise

Neste capítulo pretende-se apresentar detalhadamente a metodologia de trabalho, desde a caracterização do modelo de simulação, definição das considerações e pressupostos gerais, apresentação dos dados climáticos de cada localização ao tipo de abordagem efetuado. Ao longo da apresentação da metodologia adotada são também justificadas todas as opções tomadas.

4.1 Modelo de simulação

4.1.1 Considerações gerais

Para a definição do edifício de teste base é necessário tecer um conjunto de considerações de forma a tornar o modelo realista. Sempre que possível, foram tomadas em conta as restrições e recomendações da legislação portuguesa vigente, mais concretamente do RCCTE e do RSECE [52, 56], assumindo o edifício de teste como sendo um edifício de escritórios.

Perfis de referência de utilização dos edifícios

Os perfis de utilização são importantes na medida em que definem os ganhos internos ao longo do dia, representando as percentagens de ocupação (Figura 4.1), de utilização da iluminação (Figura 4.2) e de equipamentos (Figura 4.3) de uma forma horária.

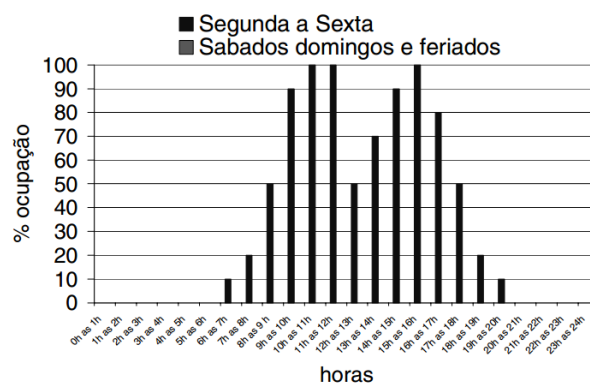


Figura 4.1: Perfil de ocupação [56]

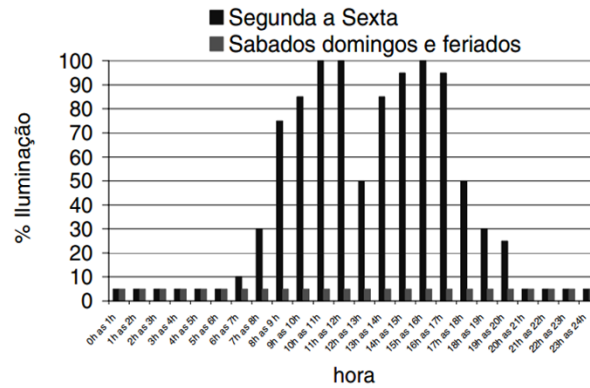


Figura 4.2: Perfil de utilização relativo à iluminação [56]

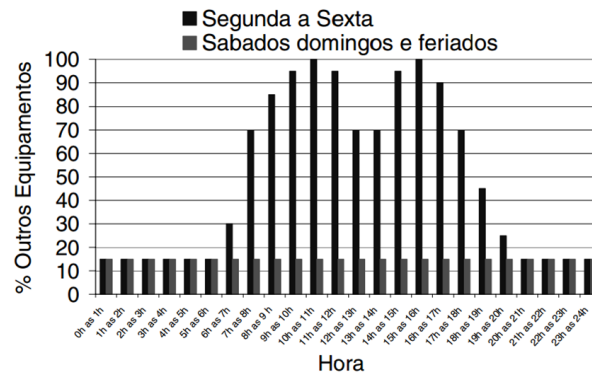


Figura 4.3: Perfil de utilização relativo a outros equipamentos [56]

Ganhos internos

Os ganhos internos são um importante fator do balanço térmico de edifícios e são relativos às densidades de ocupação, iluminação e equipamentos. Estes valores encontram-se descritos na Tabela 4.1, sendo as densidades de ocupação e equipamentos retirados do RSECE[56] e o nível de iluminância encontra-se segundo os valores recomendados pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE) para a iluminação interior [57].

Tabela 4.1: Definição dos ganhos internos do modelo de simulação

	Densidades
Ocupação	$15 \frac{m^2}{ocup}$
Iluminância	$400 \frac{lux}{m^2}$
Equipamentos	$15 \frac{W}{m^2}$

Renovações por hora

O valor de referência do RSECE relativo ao caudal mínimo de ar novo para um edifício de escritórios situa-se nos $35 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{ocup})$. Para calcular as renovações por hora mínimas recorre-se à equação 4.1 e aos valores da Tabela 4.2. Através destes dados pode-se concluir que o valor teórico das renovações por hora mínimas para o edifício de teste são de aproximadamente 0,73 rph (equação 4.2), sendo que em toda análise é usada 1 rph, excetuando naturalmente a análise de sensibilidade relativa à variação das renovações horárias.

Tabela 4.2: Parâmetros de cálculo das renovações por hora mínimas

$\dot{q}_{min} [\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{ocup}}]$	35
$V [\text{m}^3]$	320
$A [\text{m}^2]$	100
densidade de ocupação $[\frac{\text{m}^2}{\text{ocup}}]$	15

$$rph = \frac{\dot{q}_{min} \cdot A}{\text{densidade de ocupação} \cdot V} \quad (4.1)$$

$$rph = \frac{35 \cdot 100}{15 \cdot 320} \simeq 0,73 \text{ h}^{-1} \quad (4.2)$$

4.1.2 Caracterização do edifício de teste

O edifício de teste considerado é constituído por apenas uma zona e tem 100 m^2 de área útil de pavimento, com $19,8 \text{ m}$ de comprimento, 6 m de largura e $3,5 \text{ m}$ de pé direito (Figuras 4.4 e 4.5). Para potenciar o rendimento dos PCM, a fachada de maior comprimento é orientada a sul, uma vez que o comportamento de elementos com PCM beneficia de uma alta exposição à radiação solar, como foi concluído da revisão bibliográfica. No que respeita à envolvente do edifício, esta encontra-se definida na Tabela 4.3. Os envidraçados são do tipo duplo com 6 mm de espessura e com uma caixa de ar de 12 mm , já as percentagens de envidraçados nas fachadas a sul e a norte são de 30% e 10%, respetivamente.

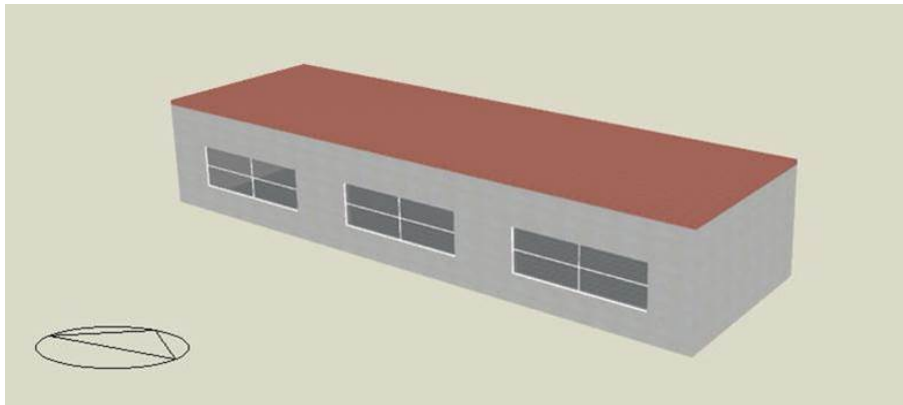


Figura 4.4: Edifício de teste, visto de sul

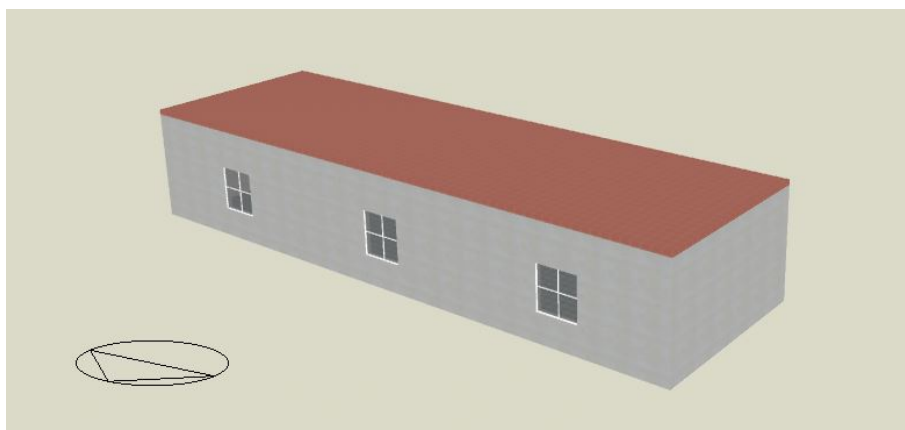


Figura 4.5: Edifício de teste, visto de norte

Tabela 4.3: Caracterização da envolvente do edifício de teste

	Materiais	Espessuras [mm]	U [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
Paredes Exteriores	Reboco (exterior)	15	0,361
	Tijolo furado	150	
	EPS	40	
	Caixa de ar	20	
	Tijolo furado	150	
	PCM ⁽¹⁾	21	
	Gesso cartonado (interior)	13	
Laje de cobertura	Cobertura cerâmica (exterior)	10	0,466
	EPS	40	
	Betão	300	
	Caixa de ar	20	
	PCM ⁽¹⁾	21	
	Gesso cartonado (interior)	13	
Pavimento interior	Betão (exterior)	300	1,034
	EPS	20	
	Betão de regularização	40	
	Ladrilhos cerâmicos (interior)	10	

Nota⁽¹⁾: no caso de referência a camada de PCM não é tida em conta.

4.1.3 Caracterização dos PCM utilizados

Os tipos de PCM utilizados têm o objetivo de contribuir para uma melhoria do comportamento térmico do edifício de teste nas estações de aquecimento e arrefecimento. Para tal, testaram-se sete tipos de PCM (Tabelas 4.4 e 4.5): três para a estação de aquecimento (15, 18 e 21 °C) e quatro para a estação de arrefecimento (23, 25, 27 e 29 °C). Estes PCM são do tipo macroencapsulado (Figura 2.4 (a)), incorporando as placas nas soluções construtivas acima referidas como camada da mesma.

Os dados dos PCM da marca BioPCM™[43] encontram-se na base de dados do *DesignBuilder*, já os PCM da Rubitherm® encontram-se descritos no site da marca através das suas curvas de temperatura-entalpia [58]. Estes últimos são dados do comportamento do PCM propriamente dito e não de uma placa de PCM como as soluções BioPCM™. Desta forma, para efeitos de simulação, editaram-se soluções na base de dados do programa alterando as curvas temperatura-entalpia já existentes, com os dados dos materiais da Rubitherm®. Este foi um procedimento necessário sendo que o *DesignBuilder* não possui PCM com temperaturas de fusão inferiores a 21 °C.

No Anexo A.1 encontram-se as curvas de temperatura-entalpia dos PCM utilizados neste trabalho.

Tabela 4.4: PCM de baixa temperatura de fusão utilizados

PCM	Rubitherm®RT15	Rubitherm®RT18HC	BioPCM™Q21
T_{fus} (°C)	15	18	21

Tabela 4.5: PCM de alta temperatura de fusão utilizados

PCM	BioPCM™Q23	BioPCM™Q25	BioPCM™Q27	BioPCM™Q29
T_{fus} (°C)	23	25	27	29

4.1.4 Dados climáticos

A primeira análise é feita para quatro localizações, como será apresentado no subcapítulo seguinte. Sendo um dos objetivos do trabalho contribuir para o estudo da aplicação de PCM no panorama português, as localizações foram escolhidas de forma a ter a maior diversidade climática possível em Portugal, garantindo naturalmente a exequibilidade do estudo.

Na Figura 4.6 encontram-se identificadas as diferentes zonas climáticas de Portugal continental segundo o RCCTE, retirando para as localizações selecionadas tem-se:

- **Lisboa** - zonas climáticas I1/V2;
- **Porto** - zonas climáticas I2/V1;
- **Bragança** - zonas climáticas I3/V2;
- **Faro** - zonas climáticas I1/V2.

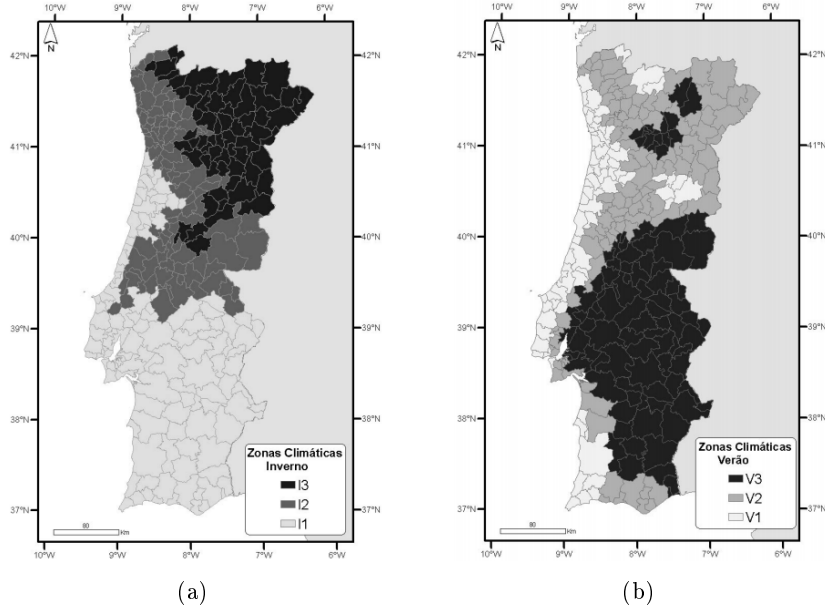


Figura 4.6: (a) Zonas climáticas de inverno ; (b) Zonas climáticas de verão [52]

Analisando estes dados, verifica-se a abordagem de diferentes climas neste estudo: Lisboa e Faro apresentam um inverno moderado e um verão quente, Porto um verão ameno e um inverno mais severo, por sua vez Bragança caracteriza-se por ter um inverno severo e um verão quente.

No Anexo A.2 encontram-se as representações gráficas das temperaturas exteriores ao longo do ano para estas quatro localizações.

4.2 Abordagem

4.2.1 Indicadores de referência

Para compreender objetivamente as necessidades de aquecimento e arrefecimento recorreu-se ao conceito de graus-dia para criar dois indicadores integrais das necessidades de arrefecimento e aquecimento: os graus-dia de arrefecimento (equação 4.3) e os graus-dia de aquecimento (equação 4.4), tomando as condições de conforto recomendadas pelo RCCTE como referência (25 °C e 20 °C, respetivamente [52]). Estes serão assumidos como critérios base de análise, uma vez que permitem comparar o impacto das diferentes soluções nas necessidades de climatização em ambas as estações de uma forma objetiva.

$$GD_{arref}^{25} = \frac{\sum_{h=1}^{8760} \max[0, (T_{int} - 25)]}{24} \quad (4.3)$$

$$GD_{aquec}^{20} = \frac{\sum_{h=1}^{8760} \max[0, (20 - T_{int})]}{24} \quad (4.4)$$

Ainda assim, para efeitos de seleção, é necessário avaliar o desempenho global das diferentes soluções, para tal foi criado o indicador anual das necessidades de climatização (equação 4.5). Este indicador é calculado através dos graus-dia supracitados e das características do sistema de climatização utilizado, permitindo ter uma perceção anual dos consumos energéticos relativos a energia primária.

$$I_{anual}^{GD} = F_{pu,arref} \cdot \frac{GD_{arref}^{25}}{\eta_{arref}} + F_{pu,aquec} \cdot \frac{GD_{aquec}^{20}}{\eta_{aquec}} \quad (4.5)$$

Na Tabela 4.6 encontram-se dados de alguns sistemas de climatização. Contudo, no decorrer deste trabalho utilizar-se-ão apenas as bombas de calor referidas na tabela, mesmo não sendo as melhores soluções do ponto de vista ambiental são as melhores opções no que toca ao consumo energético dentro das opções mais comuns. Através da equação 4.5, é possível concluir que o quociente entre o fator de conversão (F_{pu}) e o rendimento ou COP do sistema será a constante de proporcionalidade que permitirá relativizar os graus-dia de aquecimento e de arrefecimento e que, quanto maior este valor, maior é o impacto dessa solução nas necessidades de aquecimento ou arrefecimento (dependendo do caso).

Tabela 4.6: Parâmetros de cálculo do indicador anual das necessidades de climatização para os sistemas referenciados pelo RCCTE [52]

	Aquecimento			Arrefecimento
	Bomba de Calor	Caldeira GN	Caldeira Pellets	Bomba de Calor
$F_{pu} [kgep/kWh]$	0,29	0,086	0 ⁽²⁾	0,29
η/COP	4	0,87	0,6	3

Nota⁽²⁾: a produção da biomassa terá um conjunto de processos que tornam este valor pouco realista, no entanto estes não são contabilizados.

Apesar da revisão bibliográfica, na sua generalidade, revelar como grandes indicadores da viabilidade da aplicação de soluções construtivas com PCM as reduções dos picos de temperatura e da amplitude térmica diária, no decorrer deste trabalho sentiu-se a necessidade de se recorrer a novos indicadores, dadas as características do edifício de testes utilizado (descrito pormenorizadamente no subcapítulo seguinte). Esta não tem qualquer edifício na sua vizinhança, pelo que beneficia de cargas solares durante todo o dia sofrendo um sobreaquecimento constante durante a estação de arrefecimento, por exemplo, não sendo por isto linear que as reduções nos picos de temperatura e da amplitude térmica diária levem necessariamente a uma redução do consumo relativo aos sistemas de climatização. É possível observar este fenómeno através da Figura 4.7, em que se encontram representadas as flutuações da temperatura interior em Lisboa na semana de projeto de verão (*Summer Design Week*, SDW) consoante a aplicação dos diferentes tipos de PCM. Como se pode verificar a temperatura interior encontra-se quase sempre superior à temperatura exterior, evidenciando o dito sobreaquecimento.

A principal conclusão a retirar do gráfico presente na Figura 4.7 é relativa à amplitude térmica diária e aos picos de temperatura: por exemplo, é aplicando o PCM 29 que a curva da temperatura interior mais estabiliza, representando uma diminuição considerável da amplitude térmica diária e dos picos de temperatura, ainda assim na SDW esta

estabilização poderá não representar uma diminuição das necessidades de arrefecimento uma vez que aumenta mais a temperatura mínima do que diminui a temperatura máxima interior.

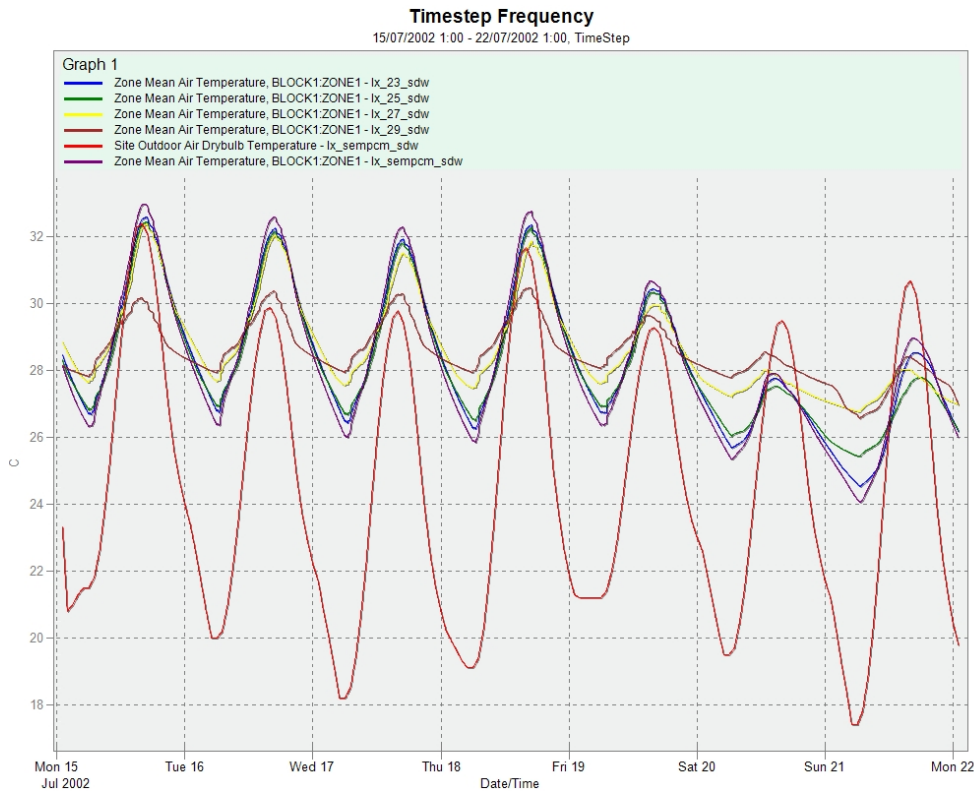


Figura 4.7: Perfis das temperaturas interiores consoante os diversos tipos de PCM utilizados para Lisboa, na semana de projeto de verão

Contudo, estes parâmetros relativos à curva da temperatura interior são úteis para a análise de casos mais realistas, isto é, para situações com um sombreamento adequado e enquadrados numa vizinhança, neste caso as reduções dos picos de temperatura e de amplitudes térmicas já deverão coincidir com a diminuição das necessidades de climatização do espaço. Posto isto, estes valores serão indicados no estudo de aplicação de componentes integrando PCM mas não servirão como critério de seleção ao longo do trabalho.

4.2.2 Procedimentos

No que diz respeito ao procedimento de estudo, este encontra-se dividido em três partes:

Aplicação de componentes integrando PCM

Em primeiro lugar, realizou-se uma análise comparativa para quatro localizações em Portugal continental: Lisboa, Porto, Bragança e Faro. A escolha destas localidades prende-se com o facto de apresentarem características climáticas distintas ao longo do ano, permitindo enfrentar diferentes problemáticas e ter uma ampla compreensão da aplicação de PCM em edifícios em Portugal.

Nesta análise, os PCM foram integrados nas paredes exteriores e na laje de cobertura do edifício de teste, em cada localização. Os PCM considerados de temperatura de fusão mais elevada (23, 25, 27 e 29 °C) têm como objetivo contribuir para a diminuição das necessidades de arrefecimento, enquanto que com os PCM de temperatura de fusão mais baixas (15, 18 e 21 °C) pretende-se obter reduções nas necessidades de aquecimento. Posteriormente, é apresentada uma solução abrangente conjugando os PCM de baixa e elevada temperatura de fusão com melhor desempenho nas referidas soluções construtivas, com o objetivo de adequar a aplicação de PCM a ambas as estações. Sendo a designação do PCM dada pela temperatura de transição, nesta solução abrangente a nomenclatura passará por representar em primeiro lugar a temperatura de fusão do PCM incorporado nas paredes exteriores e em segundo lugar a temperatura de fusão do PCM contido na laje de cobertura. A título de exemplo, se for colocado PCM 21 nas paredes e PCM 25 na laje de cobertura, a designação desta solução seria PCM 21/25.

Finalmente, são apresentadas as implicações da aplicação de PCM nas amplitudes térmicas diárias e nos picos de temperatura máxima e mínima, pretendendo-se compreender até que ponto as reduções obtidas nestes indicadores vão ao encontro das reduções relativas aos indicadores de referência concebidos para este estudo.

Esta primeira parte permitirá avaliar o impacto dos componentes com PCM por si só, entender o comportamento dos mesmos para diferentes zonas climáticas de Portugal e identificar eventuais problemas decorrentes da aplicação de soluções com PCM.

Análise de sensibilidade

Em segundo lugar, são realizadas um conjunto de análises de sensibilidade onde é pretendido avaliar o comportamento térmico do edifício de teste variando determinados parâmetros. Este exercício é efetuado apenas para os dados climáticos de Lisboa por uma questão de exequibilidade e foi escolhida esta localização por ser a região com maior densidade populacional do país, albergando mais de 25% da população portuguesa [59]. Nestes testes, a conjugação de PCM utilizados serão os definidos como solução abrangente para Lisboa (conclusão da análise anterior).

As análises de sensibilidade efetuadas foram as seguintes:

- **Renovações horárias** - nesta análise fazem-se variar as renovações por hora do edifício devido a ventilação natural, desde 1 rph até ao máximo de 10 rph que, apesar de ser um valor exagerado, é simulado para ajudar a compreender o efeito deste parâmetro. O objetivo desta variação passa por perceber até que ponto é suficiente recorrer à ventilação natural nos períodos de ocupação para resolver um eventual sobreaquecimento do edifício ou falta de descarga do PCM, sem afetar em demasia as necessidades de aquecimento. A ventilação natural apenas ocorre se a temperatura exterior não for inferior a 14 °C e superior a 24 °C.
- **Ventilação noturna** - aqui é estudada a utilidade de uma estratégia de ventilação noturna por forma a ajudar na descarga do PCM, otimizando a utilização destas soluções. O perfil de funcionamento é das 22h às 6h (beneficiando das tarifas bi-horárias), sendo apenas acionada se se verificarem as seguintes condições:

- $T_{ext} + 2 < T_{int}$, esta condição define um diferencial mínimo de temperatura entre o exterior e o interior de 2 °C, garantindo que a ventilação mecânica

apenas entre em funcionamento em condições exteriores favoráveis ao arrefecimento;

- $T_{int} > 20$, este *setpoint* foi definido tendo em conta as condições de conforto pois apenas faz sentido recorrer ao arrefecimento do compartimento se a temperatura interior for superior a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, mesmo tendo em conta que alguns PCM de baixa temperatura de fusão (15 e $18\text{ }^{\circ}\text{C}$) só descarregam se forem levados a temperaturas inferiores, mas neste caso não é do interesse o seu descarregamento à noite.

As renovações por hora devido à ventilação mecânica noturna simuladas vão das 1 às 5 rph, mantendo o valor de 1 rph constante relativo à ventilação natural no perfil de ocupação.

- **Sombreamento** - o sobreaquecimento considerável de que o edifício de teste é alvo prejudica o comportamento das soluções com PCM, aqui pretende-se compreender a influência de estratégias de sombreamento na limitação dos ganhos solares do compartimento. Os tipos de sombreamento utilizados são:
 - Persianas interiores;
 - Persianas exteriores;
 - Palas horizontais;
 - Palas horizontais e verticais.

De referir que no caso dos sombreamentos por persianas interiores ou exteriores, foram definidos dois perfis de funcionamento:

- Verão - Persianas abertas em 50% durante o dia (8h-20h) e abertas durante a noite, isto permite com que se limite os ganhos solares no período diurno e a abertura no período noturno ajuda a dissipar o calor acumulado no interior durante o dia;
- Inverno - Persianas fechadas à noite e abertas no resto do dia, com isto pretende-se conservar o calor acumulado durante o dia com o intuito de diminuir as necessidades de arrefecimento.

Solução otimizada

Finalmente, será apresentada uma solução otimizada para os dados climáticos de Lisboa. Aqui o objetivo é demonstrar o efeito global de estratégias complementares na aplicação de soluções com PCM e respetivas reduções obtidas. Essas estratégias serão definidas de acordo com as conclusões retiradas do estudo da solução abrangente e das análises de sensibilidade.

4.3 Síntese do capítulo

O presente capítulo tem como objetivo apresentar detalhadamente toda a metodologia em que este estudo se baseou. Inicialmente são tecidas as considerações e pressupostos iniciais necessários à execução do problema, desde perfis de ocupação e utilização às renovações

de ar. O edifício testado tem de área útil de pavimento 100 m^2 , de comprimento $19,8\text{ m}$ e largura 6 m , sendo uma das fachadas de maior comprimento orientada a sul com o objetivo de retirar o máximo de potencialidades da incorporação de PCM. No que diz respeito aos PCM selecionados estes provêm da base de dados do *DesignBuilder* (placas BioPCM™), sendo que foi necessário recorrer aos dados dos PCM da Rubitherm® para incluir no *software* PCM de baixa temperatura.

Finalmente, é descrita a abordagem assumida neste trabalho, sendo toda ela baseada em três indicadores: graus-dia de aquecimento, graus-dia de arrefecimento, e indicador anual das necessidades de climatização. Sumariamente, esta baseia-se em três fases:

- Aplicação de componentes com PCM - aqui o objetivo passou por compreender a influência dos diferentes tipos de PCM nas necessidades de aquecimento e arrefecimento, de forma a obter uma solução ótima (denominada solução abrangente) para ambas as estações. Finalmente são apresentadas as reduções obtidas nos picos de temperatura e nas amplitudes térmicas diárias;
- Análises de sensibilidade - nesta fase pretende-se compreender a influência da variação de diferentes parâmetros em edifícios com componentes integrando PCM. Os parâmetros testados foram: renovações por hora devido a ventilação natural durante o período de ocupação, ventilação mecânica noturna e tipos de sombreamento;
- Impacto global das estratégias - neste ponto pretende-se indicar o impacto global nas necessidades de aquecimento e arrefecimento da aplicação das melhores soluções resultantes das análises anteriores.

Capítulo 5

Resultados e análise

5.1 Aplicação de componentes com PCM

5.1.1 Lisboa

Necessidades de aquecimento e arrefecimento

Para o estudo das melhores soluções para a redução das necessidades de arrefecimento e aquecimento analisou-se o efeito de todos os tipos de PCM nos graus-dia respetivos. O caso de Lisboa caracteriza-se pelas elevadas necessidades de arrefecimento e baixas exigências de aquecimento.

Na Figura 5.1 é possível verificar o decréscimo considerável das necessidades de arrefecimento com a aplicação de PCM, sendo a redução máxima dos graus-dia de arrefecimento dada pela aplicação do PCM 25 cerca de 19% relativamente ao caso sem PCM. O aquecimento não representa uma fatia considerável das necessidades de climatização, ainda assim, recorrendo à Figura 5.2, verifica-se que a aplicação de PCM 21 quase que anula as exigências de aquecimento neste caso.

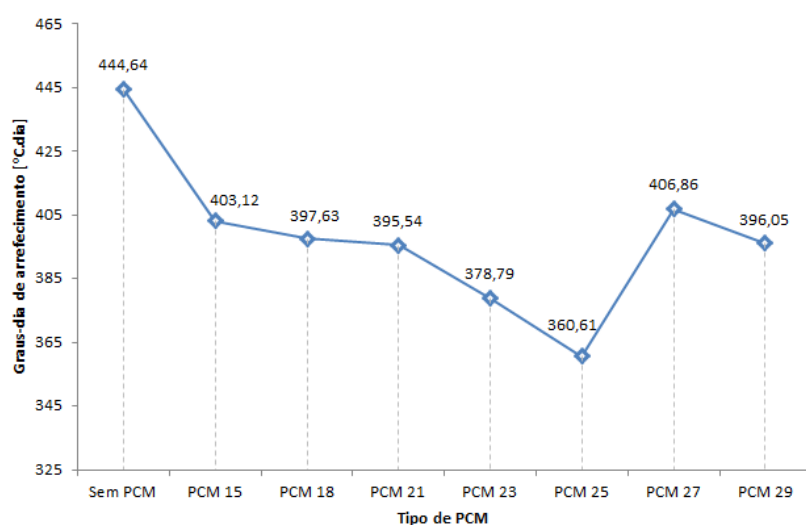


Figura 5.1: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Lisboa

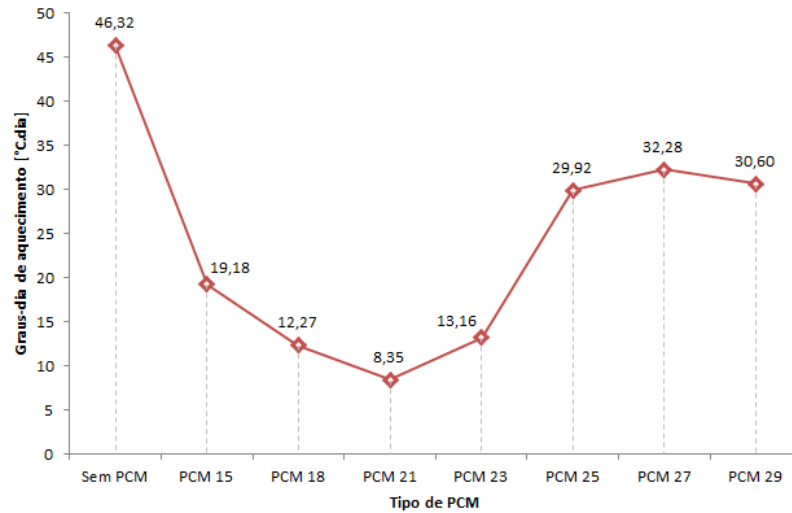


Figura 5.2: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Lisboa

Solução abrangente

Da análise prévia concluiu-se que os PCM com melhor comportamento nas estações de aquecimento e arrefecimento são os PCM 21 e PCM 25, respetivamente. Posto isto, para obter uma solução ótima para ambas as estações, estudou-se a aplicação de PCM 21 nas paredes exteriores, de PCM 25 na laje de cobertura e vice-versa. Para tal, recorreu-se ao indicador anual das necessidades de climatização de forma a conseguir avaliar globalmente esta solução. Analisando a Tabela 5.1 conclui-se que a solução PCM 25/21 é a mais eficiente do ponto de vista anual, reduzindo 21,45% face aos 19,72% obtidos pela solução PCM 21/25.

Tabela 5.1: Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Lisboa

	$GD_{arref}^{25} [^{\circ}C.dia]$	$GD_{aquec}^{20} [^{\circ}C.dia]$	$I_{anual}^{GD} [\frac{kgep.^{\circ}C.dia}{kWh}]$	redução (%)
Sem PCM	444,64	46,32	46,34	
PCM 21/25	376,15	11,61	37,20	19,72
PCM 25/21	364,31	16,32	36,40	21,45

5.1.2 Porto

Necessidades de aquecimento e arrefecimento

Comparativamente a Lisboa, o clima do Porto tem necessidades de arrefecimento mais baixas no entanto também apresenta necessidades de aquecimento mais elevadas.

Como se pode constatar na Figura 5.3, as exigências de arrefecimento descem consideravelmente também no caso do Porto, com a redução máxima a situar-se nos 36%, também com o PCM 25. No que diz respeito às necessidades de aquecimento a solução com melhor desempenho é o PCM 18, chegando a limitar em 62% (Figura 5.4).

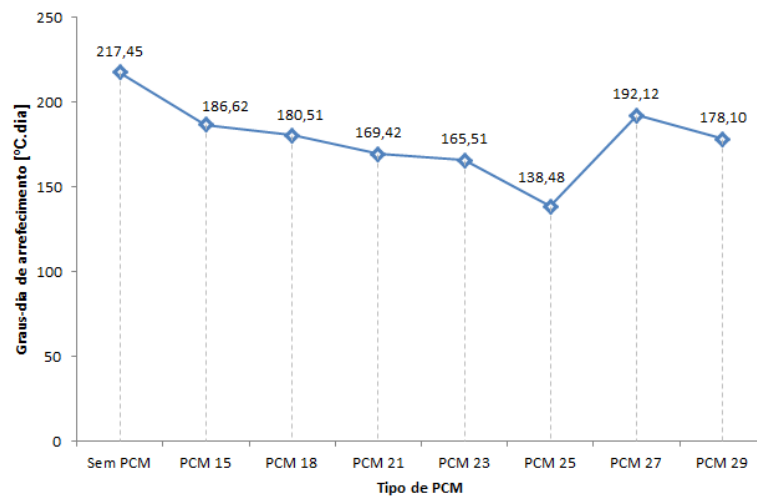


Figura 5.3: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Porto

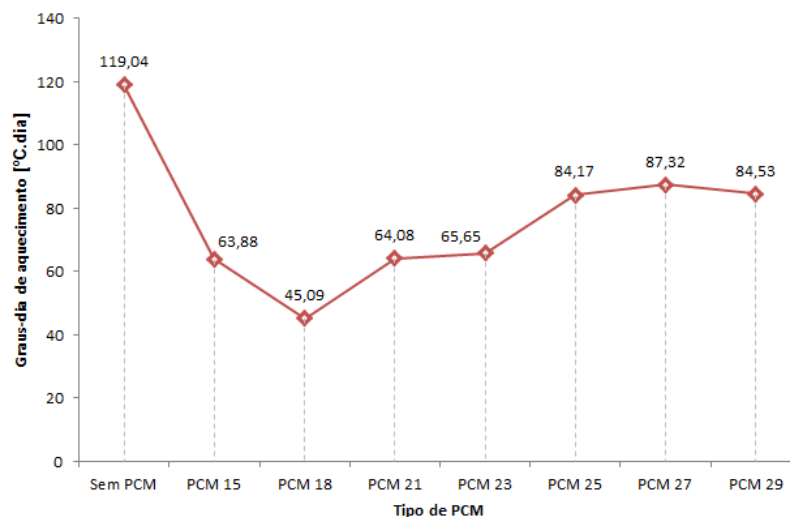


Figura 5.4: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Porto

Solução abrangente

Obtidos os PCM mais adequados para os dados climáticos do Porto, é estudada qual a melhor combinação dos dois para as soluções construtivas indicadas. A Tabela 5.2 demonstra que a melhor solução é PCM 25/18, com uma redução no indicador anual de climatização de 36%. Por sua vez, a solução PCM 18/25 também apresenta uma diminuição interessante, sensivelmente 33,82%. É de salientar o facto que, tal como em Lisboa, a combinação mais eficaz é a que incorpora o PCM de temperatura de fusão superior nas paredes exteriores, devendo-se isto à soma das áreas das paredes exteriores ser superior à da laje de cobertura (maior área de exposição ao sol).

Tabela 5.2: Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Porto

	GD_{arref}^{25} [$^{\circ}C.dia$]	GD_{aquec}^{20} [$^{\circ}C.dia$]	IGD_{anual} [$\frac{kg_{ep} \cdot ^{\circ}C.dia}{kWh}$]	redução (%)
Sem PCM	217,45	119,04	29,65	
PCM 18/25	162,03	54,62	19,62	33,82
PCM 25/18	148,12	64,21	18,97	36,01

5.1.3 Bragança

Necessidades de aquecimento e arrefecimento

Dos quatro tipos abordados neste trabalho, Bragança é o clima com maior amplitude térmica não só diária mas também anual, sendo por isso uma localização que tem necessidades de climatização elevadas em ambas as estações.

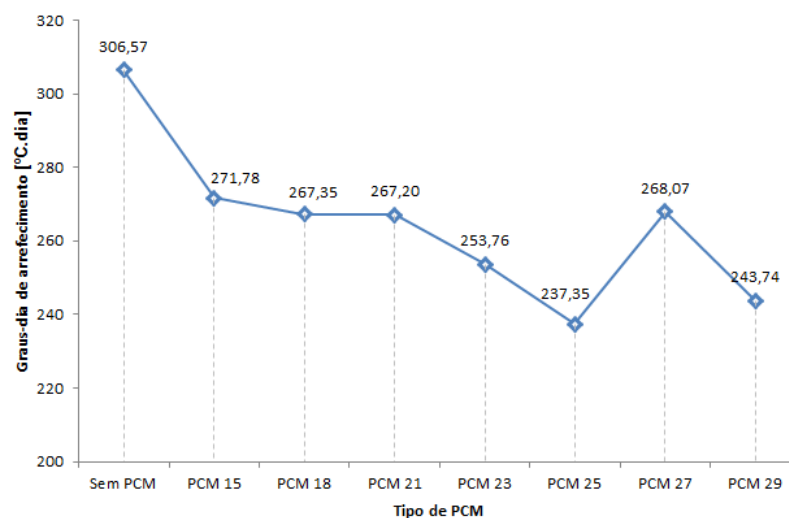


Figura 5.5: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Bragança

Através da Figura 5.5 é possível verificar a diminuição dos graus-dia de arrefecimento de uma forma geral, atingindo o mínimo no PCM 25, com uma redução em mais de 22%.

Relativamente às necessidades de aquecimento (Figura 5.6) é alcançada uma diminuição de 42%, isto para o PCM 18.

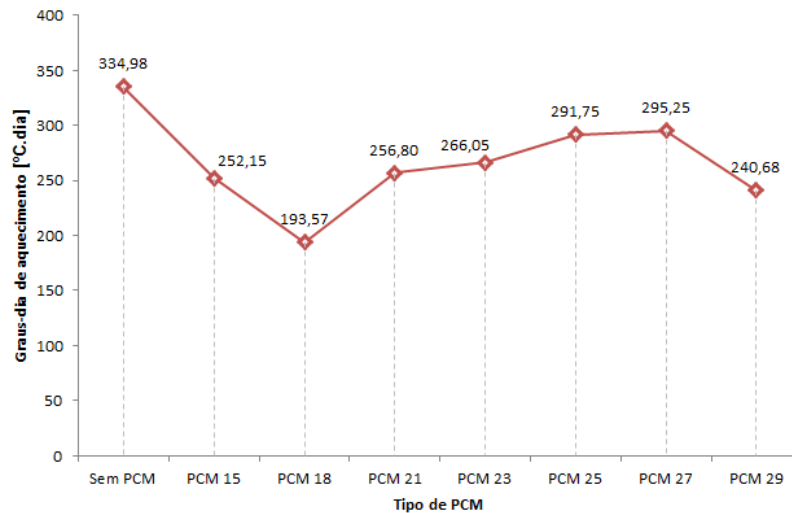


Figura 5.6: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Bragança

Solução abrangente

Recorrendo à Tabela 5.3 pode-se concluir que a solução com maior redução no indicador anual das necessidades de climatização é a PCM 18/25, atingindo os 25%. Já a solução PCM 25/18 ronda os 24%. De realçar que, ao contrário das restantes soluções abrangentes, esta apresenta o PCM com menor temperatura de fusão nas paredes exteriores.

Tabela 5.3: Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente, Bragança

	$GD_{arref}^{25} [^{\circ}C.dia]$	$GD_{aquec}^{20} [^{\circ}C.dia]$	$I_{anual}^{GD} [\frac{kgep.^{\circ}C.dia}{kWh}]$	redução (%)
Sem PCM	306,57	334,98	53,92	
PCM 18/25	254,72	217,67	40,40	25,07
PCM 25/18	243,74	240,68	41,01	23,94

5.1.4 Faro

Necessidades de aquecimento e arrefecimento

O caso de Faro é caracterizado pelas elevadas necessidades de arrefecimento e por valores muito baixos de exigências de aquecimento. A Figura 5.7 reflete a tendência de diminuição dos graus-dia de arrefecimento na mesma ordem das análises anteriores, representando um decréscimo de aproximadamente 15% para Faro, para o PCM 25. No que respeita aos graus-dia de aquecimento (Figura 5.8), a redução é quase total de tão baixas que são estas necessidades.

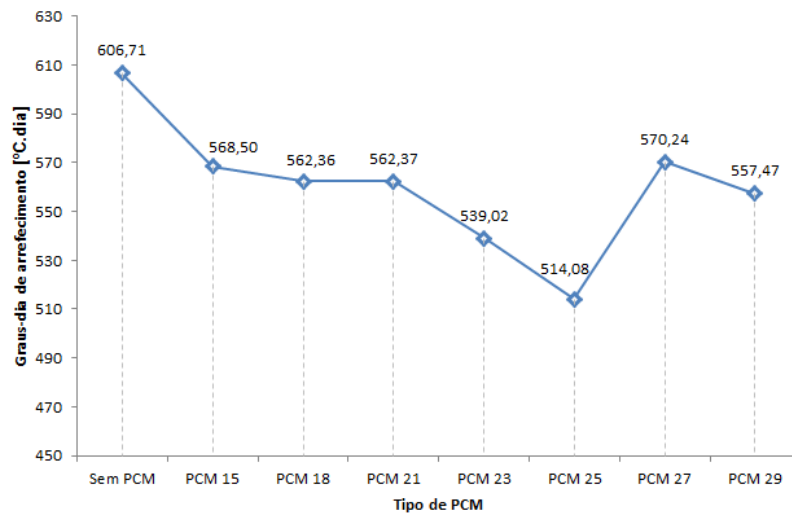


Figura 5.7: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de arrefecimento, Faro

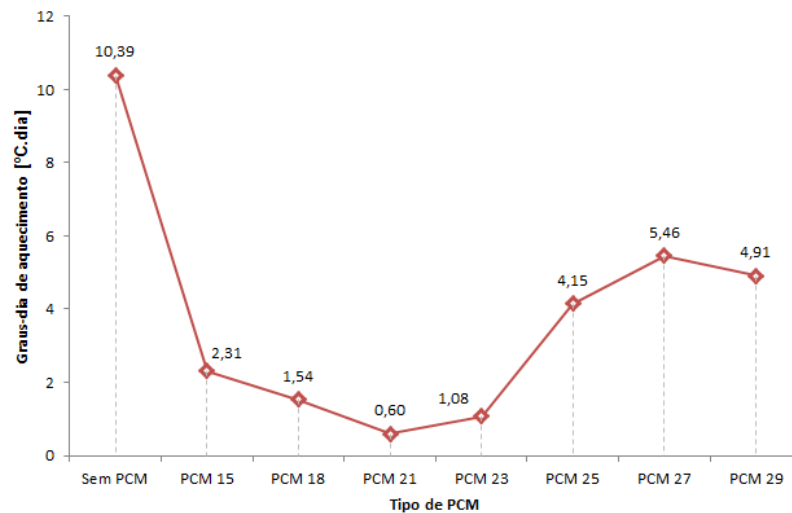


Figura 5.8: Representação do efeito dos diferentes tipos de PCM nos graus-dia de aquecimento, Faro

Solução abrangente

O estudo da solução abrangente para Faro apresenta uma particularidade relativamente às restantes que é a questão das necessidades de aquecimento serem muito baixas, levando a concluir que nesta análise poderá não ser necessário a inclusão do PCM 21 numa das soluções construtivas. Desta forma inclui-se na Tabela 5.4 a redução no indicador anual obtida pela solução PCM 25. Da mesma tabela verifica-se isso mesmo, a solução que incorpora PCM 25 em ambas as soluções construtivas apresenta uma redução no indicador anual das necessidades de climatização superior (15,84%) às restantes, pelo motivo acima referido.

Tabela 5.4: Reduções nos indicadores obtidas pela solução abrangente e PCM 25/25, Faro

	$GD_{arref}^{25} [^{\circ}C.dia]$	$GD_{aquec}^{20} [^{\circ}C.dia]$	$I_{anual}^{GD} [\frac{kg \cdot p. \cdot ^{\circ}C.dia}{kWh}]$	redução (%)
Sem PCM	606,71	10,39	59,40	
PCM 21/25	537,39	1,18	52,03	12,41
PCM 25/21	522,04	1,45	50,57	14,87
PCM 25/25	514,08	4,15	50,00	15,84

5.1.5 Implicações nas amplitudes térmicas diárias e picos de temperatura

Parte considerável dos estudos consultados na revisão bibliográfica recorre à amplitude térmica diária e aos picos de temperatura como principais parâmetros de análise do comportamento térmico de edifícios com componentes integrando PCM. Ainda assim, como referido no capítulo anterior, ao longo do estudo sentiu-se a necessidade de recorrer a indicadores objetivos de forma a validar e selecionar as diferentes soluções. Na Figura 4.7 é possível observar a diminuição da amplitude térmica diária, bem como dos picos de temperatura, no entanto com a diminuição da temperatura de pico máxima ocorre também um aumento da temperatura de pico mínima, afastando a curva da zona de conforto. Este facto permite concluir que as reduções na amplitude térmica e nos picos de temperatura podem não implicar necessariamente uma descida das necessidades de climatização.

Nas Tabelas 5.5 e 5.6 encontram-se indicadas as reduções máximas e médias obtidas relativamente às amplitudes térmicas diárias (ΔT_d) para PCM de baixa e alta temperatura, respetivamente. As reduções relativas aos picos de temperatura máxima ($\Delta T_{p,max}$) e picos de temperatura mínima ($\Delta T_{p,min}$) estão representados nas Tabelas 5.7 e 5.8, também para as duas classes de PCM. Em ambas as tabelas estão realçados a negrito os dados relativos aos PCM selecionados aquando da análise da solução abrangente.

Daqui é possível retirar que as soluções selecionadas anteriormente nem sempre coincidem com as soluções com maiores reduções dos indicadores de temperatura referidos, podendo concluir que o método adotado permite uma análise mais correta e abrangente.

Tabela 5.5: Reduções máximas e médias relativas às amplitudes térmicas diárias decorrentes da aplicação dos PCM de baixa temperatura de fusão, em °C

		PCM 15	PCM 18	PCM 21
Lisboa	$\Delta T_{d,max}$	3,30	3,50	1,17
	$\Delta T_{d,med}$	2,29	2,51	2,38
Porto	$\Delta T_{d,max}$	3,17	4,08	2,96
	$\Delta T_{d,med}$	2,00	2,38	2,41
Bragança	$\Delta T_{d,max}$	3,54	3,81	2,62
	$\Delta T_{d,med}$	2,40	3,04	2,13
Faro	$\Delta T_{d,max}$	1,78	1,91	3,66
	$\Delta T_{d,med}$	1,15	1,23	1,12

Tabela 5.6: Reduções máximas e médias relativas às amplitudes térmicas diárias decorrentes da aplicação dos PCM de alta temperatura de fusão, em °C

		PCM 23	PCM 25	PCM 27	PCM 29
Lisboa	$\Delta T_{d,max}$	1,25	1,82	1,96	2,17
	$\Delta T_{d,med}$	2,55	2,54	2,48	2,64
Porto	$\Delta T_{d,max}$	3,09	3,35	2,21	2,55
	$\Delta T_{d,med}$	2,49	2,36	1,69	1,89
Bragança	$\Delta T_{d,max}$	2,51	2,08	1,94	2,15
	$\Delta T_{d,med}$	2,23	2,11	1,97	2,14
Faro	$\Delta T_{d,max}$	1,16	1,49	2,17	2,49
	$\Delta T_{d,med}$	2,42	2,85	2,68	3,06

Tabela 5.7: Reduções máximas e médias relativas aos picos de temperatura mínima decorrentes da aplicação dos PCM de baixa temperatura de fusão, em °C

		PCM 15	PCM 18	PCM 21
Lisboa	$\Delta T_{p,min}$	1,14	1,26	1,29
	$\Delta T_{p,med}$	1,70	2,47	3,65
Porto	$\Delta T_{p,min}$	1,89	2,70	3,49
	$\Delta T_{p,med}$	1,13	1,34	1,24
Bragança	$\Delta T_{p,min}$	2,77	5,17	3,89
	$\Delta T_{p,med}$	1,22	1,64	1,11
Faro	$\Delta T_{p,min}$	1,78	1,91	3,66
	$\Delta T_{p,med}$	1,15	1,23	1,12

Tabela 5.8: Reduções máximas e médias relativas aos picos de temperatura máxima decorrentes da aplicação dos PCM de alta temperatura de fusão, em °C

		PCM 23	PCM 25	PCM 27	PCM 29
Lisboa	$\Delta T_{p,max}$	4,28	3,99	4,60	4,12
	$\Delta T_{p,med}$	1,19	1,26	1,27	1,37
Porto	$\Delta T_{p,max}$	4,55	4,14	3,74	3,52
	$\Delta T_{p,med}$	1,05	1,07	0,75	0,85
Bragança	$\Delta T_{p,max}$	5,38	4,07	4,29	4,20
	$\Delta T_{p,med}$	1,07	1,03	0,97	1,06
Faro	$\Delta T_{p,max}$	4,47	4,44	4,18	3,74
	$\Delta T_{p,med}$	1,08	1,39	1,38	1,56

5.2 Análise de sensibilidade

5.2.1 Renovações de ar

Nesta análise de sensibilidade fez-se variar as renovações por hora do edifício de teste, considerando apenas a ventilação natural, pretendendo compreender o impacto das rph na redução do indicador anual das necessidades de climatização. Estas renovações podem ser importantes não só porque permitem aliviar o sobreaquecimento do edifício mas também ajudar no ciclo carga-descarga do PCM, reduzindo a temperatura durante o dia o que permite uma descarga mais eficiente no período noturno.

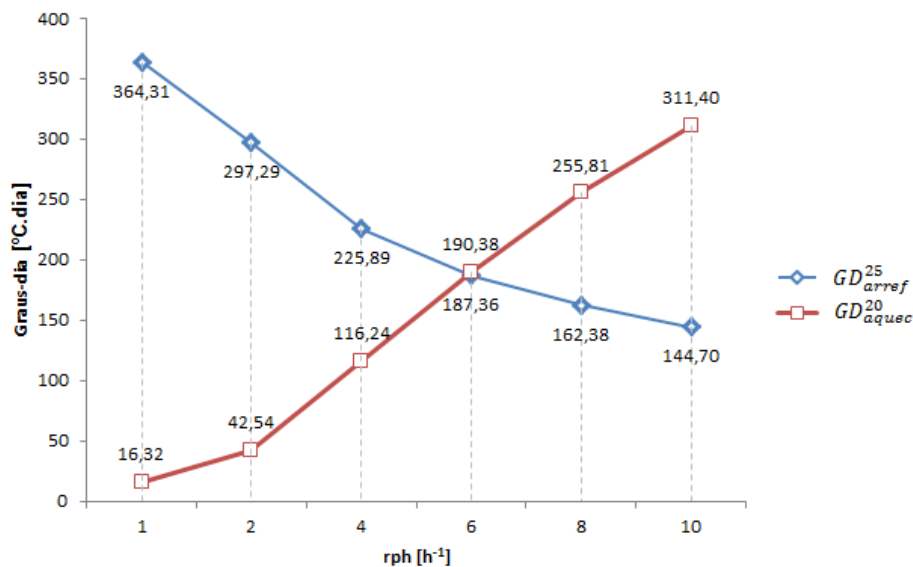


Figura 5.9: Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com as rph

A Figura 5.9 representa a evolução dos graus-dia de aquecimento e arrefecimento com o aumento das rph. Aqui pode-se verificar o aumento algo abrupto das necessidades de aquecimento a partir das 2 rph, contrastando com a diminuição quase linear das necessidades de arrefecimento. Ainda assim, para ser possível selecionar a solução ótima

para ambas as estações é necessário olhar para as necessidades globais de climatização, recorrendo ao indicador anual. Da Figura 5.10 é possível retirar que entre as 2 e as 8 renovações horárias é possível obter reduções nas necessidades de climatização, sendo que a solução mais vantajosa é a de 4 rph, com reduções situadas nos 16,86% relativamente ao caso de referência (1 rph).

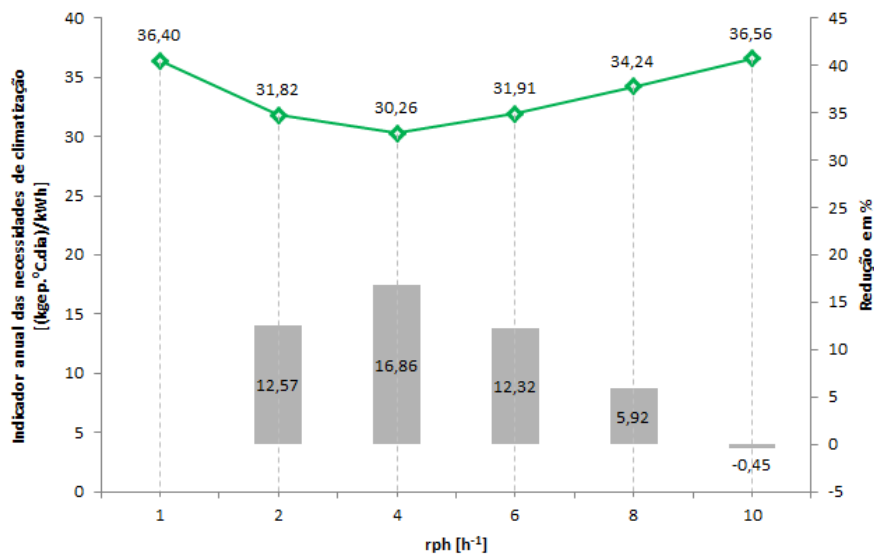


Figura 5.10: Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical da esquerda) com as rph e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical da direita)

5.2.2 Ventilação noturna

Neste estudo pretende-se avaliar o impacto de estratégias de ventilação noturna de forma a otimizar o desempenho do PCM durante o período de ocupação do edifício, tornando o ciclo carga-descarga do material mais eficaz.

A Figura 5.11 serve para constatar e validar o funcionamento dos *setpoints* de utilização definidos. Para este caso é possível observar nos três períodos noturnos representados que a ventilação mecânica é ligada durante a noite para uma temperatura interior superior a 20 °C e uma vez atingido este valor a ventilação noturna é desligada.

Na Figura 5.12 encontra-se representado o efeito das renovações horárias por ventilação noturna nos graus-dia de aquecimento e arrefecimento. Aqui pode-se constatar que a curva dos graus-dia de arrefecimento tem um comportamento quase logarítmico, cuja assíntota horizontal aparenta situar-se por volta dos 100 °C.dia portanto, para os valores simulados, o mínimo situa-se nas 5 rph representando uma redução de cerca de 67% nos graus-dia de arrefecimento. No que diz respeito às necessidades de aquecimento estas demonstraram ser pouco afetadas pela ventilação noturna, podendo-se concluir que é na descarga do PCM de temperatura mais elevada que esta estratégia é mais importante.

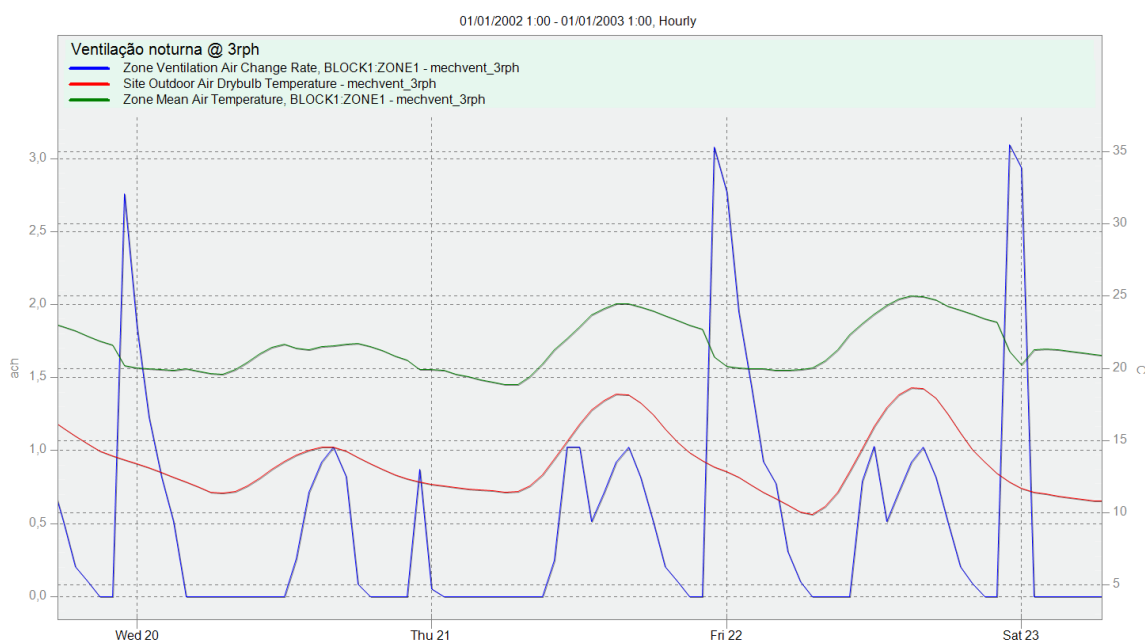


Figura 5.11: Exemplificação do funcionamento da ventilação mecânica noturna para o período de 20 a 23 de junho

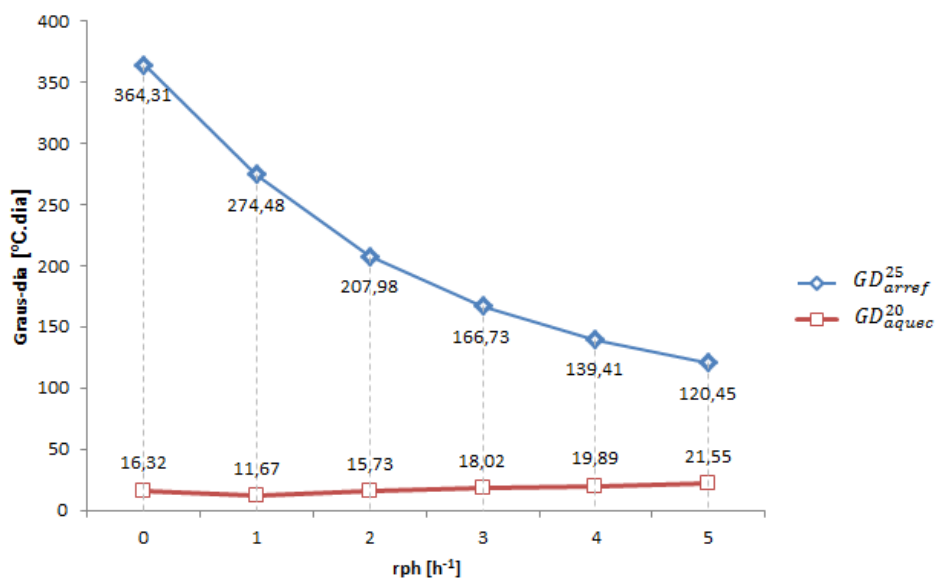


Figura 5.12: Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com as rph de ventilação noturna

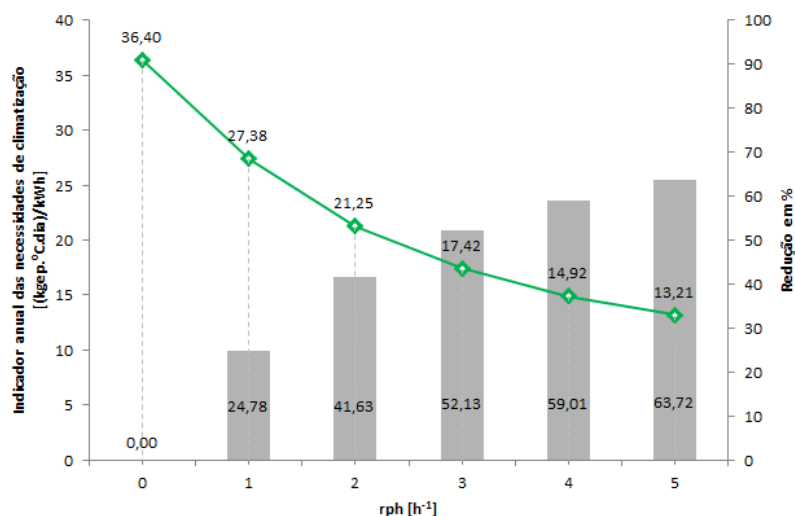


Figura 5.13: Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical à esquerda) com as rph de ventilação noturna e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical à direita)

Posto isto, na Figura 5.13 encontram-se representadas as reduções no indicador anual das necessidades de climatização. Daqui pode-se concluir a grande importância da existência de uma estratégia de ventilação noturna de forma a otimizar o desempenho do PCM, chegando mesmo a reduções de quase 63,72% nas necessidades anuais de climatização para as 5 rph de ventilação noturna.

5.2.3 Sombreamento

Aqui é pretendido verificar até que ponto a limitação dos ganhos solares por sombreamento é útil e se as estratégias de funcionamento definidas são benéficas para as exigências de climatização.

De uma forma geral, pode-se observar na Figura 5.14 um decréscimo considerável dos graus-dia de arrefecimento com a aplicação das referidas estratégias de sombreamento, especialmente na aplicação de sombreamentos exteriores, por persianas ou palas. Daqui retira-se também que as persianas não têm grande impacto nos graus-dia de aquecimento, ao contrário da incorporação de palas de sombreamento que aumentam as necessidades de aquecimento.

A aplicação de persianas exteriores (segundo o modo de funcionamento descrito no capítulo anterior) alcança uma redução de aproximadamente 67% nas necessidades de arrefecimento. No que diz respeito às palas, pode-se concluir que quanto mais se recorre a este tipo de sombreamento, mais se reduzem as necessidades de arrefecimento e aumentam as de aquecimento. No caso da aplicação de palas horizontais de 1,5 m e de palas laterais de 1 m chega-se mesmo a um aumento em mais de sete vezes dos graus-dia de aquecimento e a uma redução de 80% nos graus-dia de arrefecimento. Dado o comportamento inverso das curvas de graus-dia, é necessário recorrer ao indicador anual das necessidades de climatização (Figura 5.15) para efetuar a comparação.

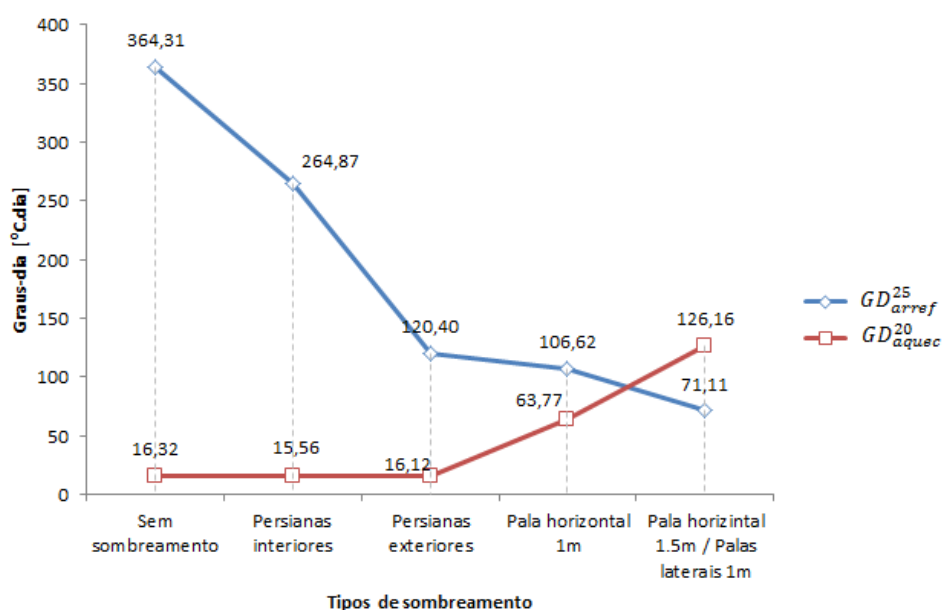


Figura 5.14: Representação da variação dos GD de aquecimento e arrefecimento com o tipo de sombreamento

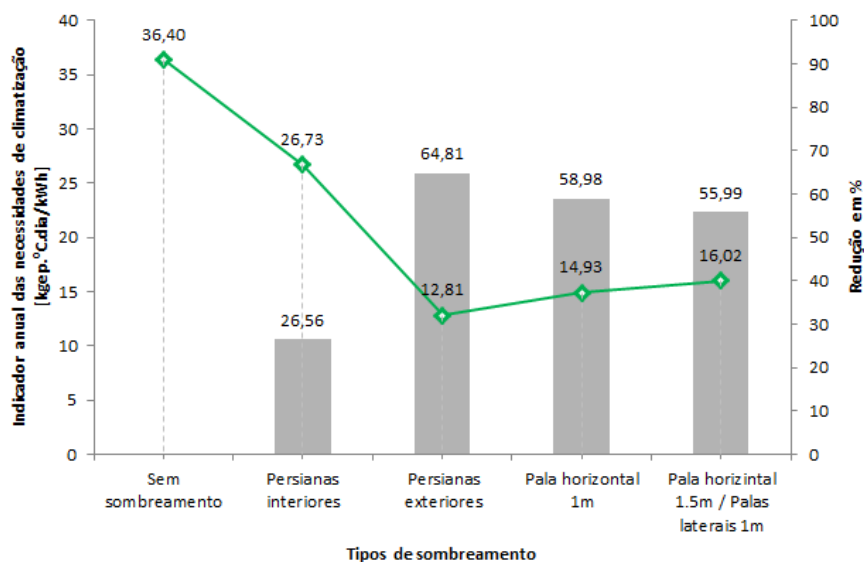


Figura 5.15: Representação da variação do indicador anual das necessidades de climatização (eixo vertical à esquerda) com o tipo de sombreamento e respetivas reduções em percentagem (eixo vertical à direita)

Aqui pode-se verificar a proximidade das reduções obtidas pelas três soluções referidas acima, destacando-se a aplicação de persianas exteriores como a solução que mais reduz o indicador anual das necessidades de climatização (em 64,81%). Com valores tão próximos poderia ser necessário verificar o efeito de cada estratégia de sombreamento na iluminação natural, podendo aumentar os consumos de iluminação artificial. No entanto, também em termos de iluminação natural a solução que recorre a persianas exteriores é mais vantajosa pois apresenta 75% de *daylighting* por área útil de pavimento, enquanto que aplicando a pala horizontal este indicador é reduzido para 63%.

5.3 Impacto global das soluções

Do estudo da aplicação de componentes PCM e da análise de sensibilidade, é possível seleccionar as soluções com melhor desempenho relativamente às necessidades de climatização. Assim sendo, a solução otimizada para os dados climáticos de Lisboa possui as seguintes características:

- Aplicação de PCM 25 nas paredes exteriores e de PCM 21 na laje de cobertura;
- Renovações horárias devido a ventilação natural segundo o período de ocupação: 4 rph;
- Ventilação mecânica noturna de 5 rph, das 22h às 6h;
- Sombreamento de janelas exterior através de persianas nos envidraçados.

Na Tabela 5.9 estão representadas as reduções obtidas pelas diferentes estratégias resultantes da análise de sensibilidade relativamente ao caso de referência (solução abrangente PCM 25/21). Estes dados permitem observar quais as estratégias mais importantes de forma a otimizar o desempenho de soluções com PCM. Desta forma é possível concluir que a ventilação no período noturno é a medida mais significativa, reduzindo em 63,72% o indicador anual das necessidades de climatização. Esta facto reforça a ideia de que é absolutamente essencial complementar a aplicação de PCM com uma estratégia de ventilação que garanta a descarga completa dos PCM. Com a aplicação. Finalmente, com a aplicação de todas as soluções a redução do indicador anual das necessidades de climatização é de quase 79 %, verificando as grandes potencialidades de soluções com PCM e respetiva articulação com estratégias complementares. Na Tabela 5.9 também é possível observar que as reduções incidem essencialmente sobre as necessidades de arrefecimento.

Tabela 5.9: Reduções nos indicadores obtidas pelas diferentes estratégias

	GD_{arref}^{25}	GD_{aquec}^{20}	I_{anual}^{GD}	redução (%)
Referência (aplicação PCM 25/21)	364,31	16,32	36,40	
Ventilação natural (4 rph)	225,89	116,24	30,26	16,86
Ventilação mecânica noturna (5 rph)	120,45	21,55	13,21	63,72
Sombreamento (persianas exteriores)	120,40	16,12	12,81	64,81
Impacto global	55,47	31,50	7,65	78,99

5.4 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados do estudo realizado. Os resultados obtidos permitem validar a utilização de PCM para climas mediterrânicos, mais concretamente para o caso português. Obtiveram-se reduções significativas nas necessidades de aquecimento e arrefecimento para as quatro localizações de Portugal continental simuladas. Os decréscimos atingidos mais acentuados no indicador anual de climatização para cada localização situam-se entre os 15,84% (Faro) e os 36,01% (Porto), isto para as melhores soluções abrangentes.

Pode-se também concluir que o método de abordagem que recorre somente à diminuição das amplitudes térmicas diárias e dos picos de temperatura pode não ser viável para todos os casos, sendo apresentado uma abordagem diferente baseada nos graus-dia de aquecimento e arrefecimento.

Finalmente, conclui-se que é fulcral a utilização de estratégias complementares à aplicação de PCM. Destas estratégias destacam-se a ventilação noturna como forma de auxílio à descarga dos PCM, com um decréscimo relativamente à solução abrangente de 63,72%, e a limitação dos ganhos solares através de sombreamento local dos envidraçados, chegando a reduções de 64,81%.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

6.1 Conclusões gerais

Após a realização do estudo e analisados os seus resultados, passa-se à apresentação das principais conclusões, terminando com algumas sugestões de trabalho futuro. Pode-se afirmar que os objetivos estabelecidos para a dissertação foram cumpridos de modo geral e o contributo pretendido alcançado.

O presente estudo levou a cabo a análise do efeito de soluções construtivas com PCM sobre o consumo energético de edifícios. Este estudo foi efetuado para o clima português, mais concretamente para as seguintes localizações: Lisboa, Porto, Bragança e Faro. Pertencendo a zonas climáticas diferentes, estas permitiram analisar diferentes problemáticas e consequentemente tirar conclusões distintas relativamente aos tipos de PCM mais adequados para cada localização. Para todos os casos, a aplicação de um único PCM nas paredes exteriores e laje de cobertura levou a uma diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento, daqui é possível concluir desde já as potencialidades dos PCM na redução do consumo energético de edifícios.

O estudo de uma solução abrangente, que optimize a redução de consumo numa base anual, permitiu verificar a possibilidade de diferentes tipos de PCM coincidirem na envolvente, de forma a obter reduções consideráveis nas necessidades de climatização para ambas as estações. Os resultados demonstram que para necessidades de arrefecimento superiores às de aquecimento (Lisboa, Porto e Faro), é favorável colocar o PCM de temperatura superior nas paredes exteriores, devendo-se ao facto desta solução construtiva ter uma área maior de exposição ao sol. O caso de Bragança é uma situação diferente, caracterizando-se por elevadas necessidades quer de aquecimento quer de arrefecimento e uma vez que as últimas são superiores, recomenda-se a incorporação do PCM de baixa temperatura de fusão na face interior das paredes exteriores (como se pode constatar na Tabela 6.1). Em suma, para uma solução de base anual, a aplicação do tipo de PCM na solução construtiva de maior área de exposição ao sol depende das necessidades de climatização mais significativas.

A Tabela 6.1 resume as soluções com PCM com maiores reduções nas necessidades de climatização relativas ao arrefecimento e ao aquecimento, bem como as soluções abrangentes para cada localização. Daqui pode-se retirar que para casos com necessidades de aquecimento muito pequenas, o estudo da solução abrangente perde importância, como é o caso de Faro onde a solução abrangente chega a aumentar as necessidades de arrefecimento face à aplicação de PCM 25 em ambas as soluções construtivas. Ainda recorrendo

Tabela 6.1: Temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho nas estações de arrefecimento e de aquecimento e respetivas soluções abrangentes, em °C

	Lisboa	Porto	Bragança	Faro
Arrefecimento	25	25	25	25
Aquecimento	21	18	18	21
Solução Abrangente	25/21	25/18	18/25	25/25

à Tabela 6.1 pode-se observar que as temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho são praticamente os limites da zona de conforto, podendo com isto concluir que se, por exemplo, a temperatura de conforto máxima fosse aumentada para os 26 °C o PCM 27 poderia eventualmente tornar-se numa das soluções ótimas.

A existência de estratégias complementares de ventilação é absolutamente fundamental na otimização do desempenho de soluções integrando PCM. O recurso a ventilação natural nos períodos de ocupação revelou um impacto reduzido, aliviando sobretudo o sobreaquecimento de que é alvo o edifício de teste em vez de melhorar o ciclo carga-descarga do material propriamente dito. Já a estratégia de ventilação noturna adotada provou ser um ponto chave na otimização da aplicação de PCM reduzindo, por si só, mais de 63% nas necessidades de climatização. Posto isto, pode-se concluir que um desempenho correto da aplicação de PCM na envolvente só é possível com a descarga completa do material no período noturno, seja através de ventilação forçada ou mediante condições exteriores favoráveis, nomeadamente uma forte descida das temperaturas exteriores durante a noite.

A limitação dos ganhos solares pelos envidraçados através de estratégias de sombreamento também se revelou muito importante no comportamento térmico do edifício de testes, obtendo uma redução máxima de 64,81%, para o caso das persianas exteriores. Reduções tão elevadas devem-se essencialmente ao excesso de cargas solares incidentes sobre a edifício, uma vez que esta não tem qualquer vizinhança que faça sombra, levando a um sobreaquecimento do espaço o que representa uma dificuldade extra na medida em que sobrecarrega o PCM, tornando a completação do seu ciclo térmico mais complicada. Deve contudo ser salientado que, embora extrema, esta situação não é rara, sobretudo em edifícios com vários pisos e destacados da malha urbana.

O impacto global das medidas de otimização do desempenho do edifício de testes com PCM situa-se aproximadamente nos 79% de reduções no indicador anual das necessidades de climatização, reforçando a extrema importância de estabelecer estratégias complementares.

Pode-se também concluir que o método de abordagem que recorre à diminuição das amplitudes térmicas diárias e dos picos de temperatura pode ser redutor para alguns casos como o desta dissertação, sendo apresentada uma abordagem diferente baseada nos graus-dia de aquecimento e arrefecimento como indicadores integrais das necessidades de climatização.

6.2 Sugestões de trabalho futuro

Ao longo do estudo foram identificadas algumas áreas que poderiam ser objeto de afinação ou desenvolvimento futuro.

No que diz respeito ao edifício de teste, seria interessante estudar a variação destes e de outros parâmetros, bem como das estratégias complementares sugeridas em ambiente urbano, isto é, com uma vizinhança que permitisse um sombreamento adequado e realista que limitasse as cargas solares. Por outro lado, seria também importante verificar a influência da compartimentação do edifício no comportamento térmico da envolvente com PCM.

Sendo as cargas internas um componente importante do balanço térmico de edifícios, é sugerido que se efetue um estudo de modo a compreender a influência destas cargas no desempenho térmico de uma envolvente com PCM.

Tendo em vista potenciais descidas das necessidades de aquecimento seria interessante estudar a incorporação de PCM no pavimento, tornando o piso radiante e avaliando a relação desta solução com a percentagem de envidraçados.

Este trabalho demonstra as potencialidades da incorporação de PCM na envolvente, contudo, seria interessante avaliar o desempenho de PCM quando integrados noutras soluções como paredes de trombe ou sistemas solares de aquecimento, por exemplo.

A elaboração de um estudo paramétrico para as nove combinações de zonas climáticas de Portugal aumentaria a abrangência destes resultados, bem como construir uma base de análise consistente para a aplicação de PCM em edifícios no panorama português e mediterrânico.

Sendo a análise feita nesta dissertação baseada em necessidades de climatização, seria interessante estudar a aplicação de diferentes sistemas AVAC, avaliando as reduções obtidas no consumo energético de cada sistema decorrente da incorporação de PCM na envolvente do edifício.

Tendo em vista a racionalização da utilização de PCM, sugere-se um estudo de variação da quantidade de PCM presente na envolvente que vá ao encontro das necessidades de cada caso.

Sugere-se ainda a implementação de um indicador global que contemple os decréscimos das temperaturas de pico, graus-dia de aquecimento ou arrefecimento e reduções das amplitudes térmicas, de modo a dar um peso relativo aos indicadores de temperatura, uma vez que não são considerados neste estudo para efeitos de seleção.

Bibliografia

- [1] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394 – 398, 2008.
- [2] Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, 153/13-35, 19 de maio de 2010.
- [3] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42(9):1361 – 1368, 2010.
- [4] J. M. Monteiro, J. L. Barroso de Aguiar, L. Bragança, J. Rocha Gomes, and P. Santos. Argamassas com desempenho térmico melhorado. *Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, 1, Lisboa, 2005.
- [5] P. Tatsidjodoung, N. Le Pierrès, and L. Luo. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18(0):327 – 349, 2013.
- [6] K. Peippo, P. Kauranen, and P. D. Lund. A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating. *Energy and Buildings*, 17(4):259 – 270, 1991.
- [7] K. Darkwa, P. W. O’Callaghan, and D. Tetlow. Phase-change drywalls in a passive-solar building. *Applied Energy*, 83(5):425 – 435, 2006.
- [8] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Medrano, J. Roca, M. Nogués, and A. Castell. Use of microencapsulated phase change material in building applications. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference, Oak Ridge National Laboratory*, 2007.
- [9] J. Kosny, D. W. Yarbrough, K. E. Wilkes, D. Leuthold, and A. Syad. Pcm-enhanced cellulose insulation thermal mass in lightweight natural fibers. In *2006 ECOSTOCK Conference, IEA, DOE, Richard Stockton College of New Jersey*.
- [10] J. Kosny, D. Yarbrough, W. Miller, T. Petrie, P. Childs, and A. Syad. Field testing of cellulose fiber insulation enhanced. Technical report, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2007/186, 2008.
- [11] J. Kosny, D. Yarbrough, W. Miller, T. Petrie, P. Childs, and A. Syad. PCM-enhanced building envelopes in current ornl research. Technical report, Oak Ridge National Laboratory Report ORNL/TM-2007/186, 2008.

- [12] P. Principi and R. Fioretti. Thermal analysis of the application of PCM and low emissivity coating in hollow bricks. *Energy and Buildings*, 51(0):131 – 142, 2012.
- [13] F. Goia, M. Perino, and V. Serra. Improving thermal comfort conditions by means of PCM glazing systems. *Energy and Buildings*, 60(0):442 – 452, 2013.
- [14] M. Stamatiadou, K. Antonopoulos, and M. Founti. Energy savings using floor tiles with phase change materials in a southern european country. In *Effstock 2009, 11th International Conference on Thermal Energy Storage - Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability*.
- [15] H. Weinlader, A. Beck, and J. Fricke. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. *Solar Energy*, 78(2):177 – 186, 2005. ISES Solar World Congress 2003.
- [16] I. Cerón, J. Neila, and M. Khayet. Experimental tile with phase change materials (pcm) for building use. *Energy and Buildings*, 43(8):1869 – 1874, 2011.
- [17] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F. Cabeza. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42(4):534 – 540, 2010.
- [18] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F. Cabeza. Analysis of the simulation models for the use of PCM in buildings. In *Effstock 2009, 11th International Conference on Thermal Energy Storage. Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability*.
- [19] N. Soares, J.J. Costa, A.R. Gaspar, and P. Santos. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency. *Energy and Buildings*, 59(0):82 – 103, 2013.
- [20] D. P. Bentz and R. Turpin. Potential applications of Phase Change Materials in concrete technology. *Cement and Concrete Composites*, 29(7):527 – 532, 2007.
- [21] D. Tetlow, Y. Su, and S. Riffat. EnergyPlus simulation analysis of incorporating microencapsulated PCMs (Phase Change Materials) with internal wall insulation (IWI) for hard-to-treat (HTT) houses in the UK. In *10th International Conference on Sustainable Energy Technologies*.
- [22] S. Shrestha, W. Miller, T. Stovall, A. Desjarlais, K. Childs, W. Porter, M. Bhandar, and S. Coley. Modeling PCM-enhanced insulation system and benchmarking EnergyPlus against controlled field data. In *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney. 14-16 November 2011*.
- [23] A. Tardieu, S. Behzadi, J. Chen, and M. Farid. Computer simulation and experimental measurements for an experimental PCM-impregnated office building. In *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney. 14-16 November 2011*.
- [24] J. Mazo, M. Delgado, J. M. Marin, and B. Zalba. Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool:

- Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump. *Energy and Buildings*, 47(0):458 – 466, 2012.
- [25] P. C. Tabares-Velasco, C. Christensen, and M. Bianchi. Verification and validation of EnergyPlus Phase Change Material model for opaque wall assemblies. *Building and Environment*, 54(0):186 – 196, 2012.
- [26] ASHRAE std 140 - standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. *ASHRAE Standard 140*, 2004.
- [27] M. Ibanez, A. Lázaro, B. Zalba, and L. F. Cabeza. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering*, 25(11 - 12):1796 – 1807, 2005.
- [28] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, and D. Quenard. Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and Phase Change Material. *Energy and Buildings*, 38(6):673 – 681, 2006.
- [29] H. Schranzhofer, P. Puschnig, A. Heinz, and W. Streicher. Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storage and PCM wall construction elements. In *2006 Ecstock Conference, Richard Stockton College of New Jersey*.
- [30] F. Kuznik, J. Virgone, and K. Johannes. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. *Energy and Buildings*, 42(7):1004 – 1009, 2010.
- [31] F. Almeida, D. Zhang, A. Fung, and W. Leong. Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storage and PCM wall construction elements. In *International High Performance Buildings Conference 2010*.
- [32] N. Fernandes and V. Costa. Use of phase-change materials as passive elements for climatization purposes in summer: the portuguese case. *International Journal of Green Energy*, 6(3):302–311, 2009.
- [33] P. Hoes, M. Trcka, J. Hensen, and B. H. Bonnema. Investigating the potential of a novel low-energy house concept with hybrid adaptable thermal storage. *Energy Conversion and Management*, 52(6):2442 – 2447, 2011. 9th International Conference on Sustainable Energy Technologies (SET 2010).
- [34] D. Heim. Isothermal storage of solar energy in building construction. *Renewable Energy*, 35(4):788 – 796, 2010.
- [35] RG Energy Efficiency Systems. Phase change energy storage technology: sensible heat vs latent heat. visitado em 5 de novembro de 2013. <http://rgees.com/technology.php>.
- [36] M. Fatih Demirbas. Thermal energy storage and Phase Change Materials: An overview. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 1(1):85–95, 2006.

- [37] S .M. Hasnain. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part i: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management*, 39(11):1127 – 1138, 1998.
- [38] C.Y. Zhao and G.H. Zhang. Review on microencapsulated Phase Change Materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8):3813 – 3832, 2011.
- [39] B. Šumiga and B. Boh. Preparation of microencapsulated paraffinic PCMs by in situ polymerisation. In *2nd International Conference on Sustainable Energy Storage, 19-21 June 2013*.
- [40] National Gypsum. ThermalCORE™ Panel. visitado em 3 de novembro de 2013. <http://www.ecobuildingpulse.com/news/2009/11/greenbuild-product-introductions.aspx>.
- [41] A. M. Khudhair and M. M. Farid. A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using Phase Change Materials. *Energy Conversion and Management*, 45(2):263 – 275, 2004.
- [42] D. Zhou, C.Y. Zhao, and Y. Tian. Review on thermal energy storage with Phase Change Materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92(0):593 – 605, 2012.
- [43] PHASE CHANGE Energy Solutions Australia. BioPCM®. visitado em 3 de novembro de 2013. <http://www.phasechange.com.au/>.
- [44] D. W. Hawes, D. Feldman, and D. Banu. Latent heat storage in building materials. *Energy Build*, 20:77–86, 1993.
- [45] A. Markopoulos. PCM performance optimisation in buildings using active cooling systems. *Department of Mechanical Engineering, University of Strathclyde*, September 2008.
- [46] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi. Review on thermal energy storage with Phase Change Materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(2):318–345, 2009.
- [47] S. D. Sharma and K. Sagara. Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, (2):1–56, 2007.
- [48] K. S. Reddy. Thermal modelling of PCM-based solar integrate water heating system. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129(4):458–464, 2007.
- [49] W. Y. Saman and M. Belusko. Roof integrated unglazed transpired solar air heater. In *Proceedings of the 1997 Australian and New Zealand Solar Energy Society. Paper 66, Canberra, Australia; 1997*.
- [50] European Renewable Energy Council (EREC) New4Old project. Trombe wall. visitado em 3 de novembro de 2013. <http://www.new4old.eu/>.

-
- [51] Educate Sustainability Environmental Design in University Curricula and Architectural Training in Europe. Thermal building system. visitado em 6 de novembro de 2013. <http://www.educate-sustainability.eu/>.
- [52] *RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios*, Decreto-Lei 80/2006 de 4 de Abril.
- [53] The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. 27 Setembro 2013.
- [54] The Reference for EnergyPlus Calculations. EnergyPlus engineering reference. 1 Outubro 2013.
- [55] David Tetlow. Issues of modelling PCM, a case study in EnergyPlus simulation. visitado em 4 de novembro de 2013. <http://www.cibse.org/>.
- [56] *RSECE - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios*, Decreto-Lei 79/2006 de 4 de Abril.
- [57] *Níveis de iluminação recomendados para iluminação interior - Comissão Internacional de Iluminação (CIE)*, 2001.
- [58] Rubitherm Technologies GmbH. Rubitherm®Phase Change Materials. visitado em 3 de novembro de 2013. <http://www.rubitherm.de/>.
- [59] Base de Dados de Portugal Contemporâneo. Fundação Francisco Manuel dos Santos PORDATA. Distribuição da população residente em portugal. visitado em 12 de novembro de 2013. <http://www.pordata.pt>.

Apêndice A

Anexos

A.1 Curvas temperatura-entalpia dos PCM utilizados

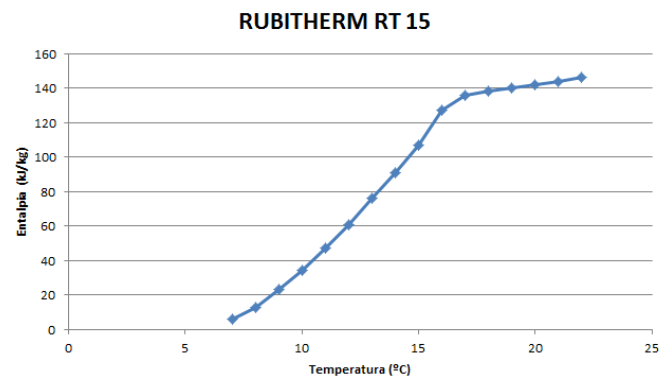


Figura A.1: Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm®RT 15, valores retirados de [58]

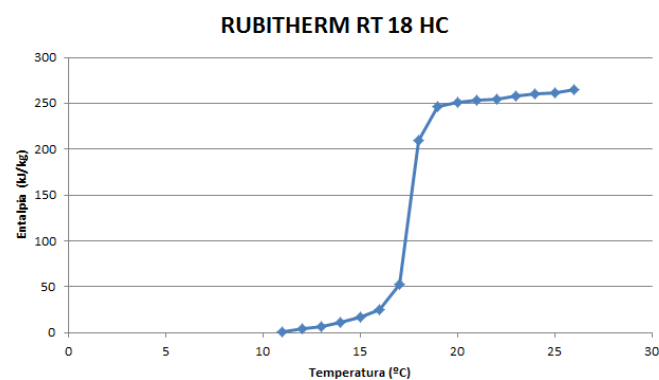


Figura A.2: Curva temperatura-entalpia do PCM Rubitherm®RT 18 HC, valores retirados de [58]

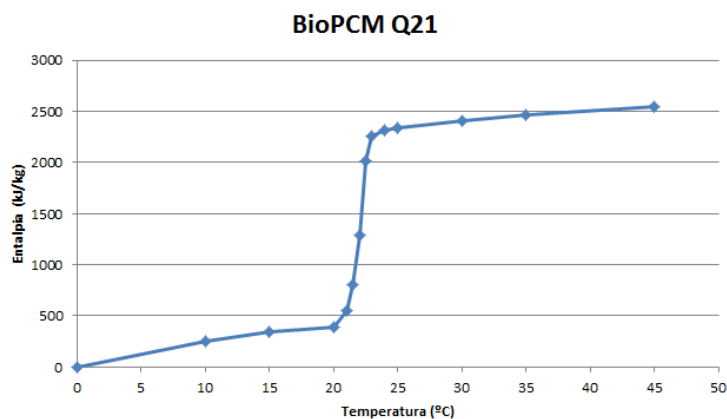


Figura A.3: Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q21, valores retirados do *DesignBuilder*

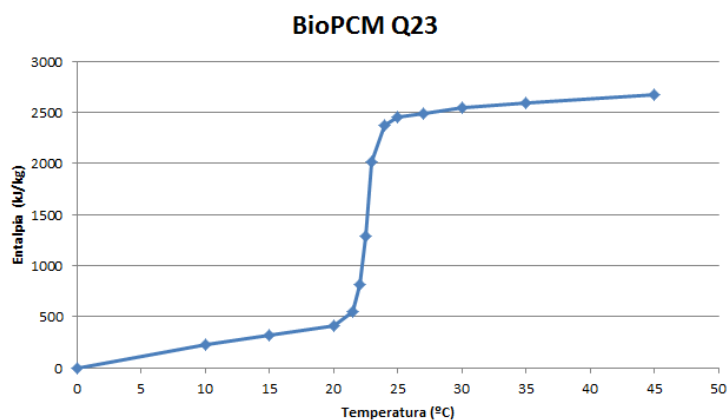


Figura A.4: Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q23, valores retirados do *DesignBuilder*

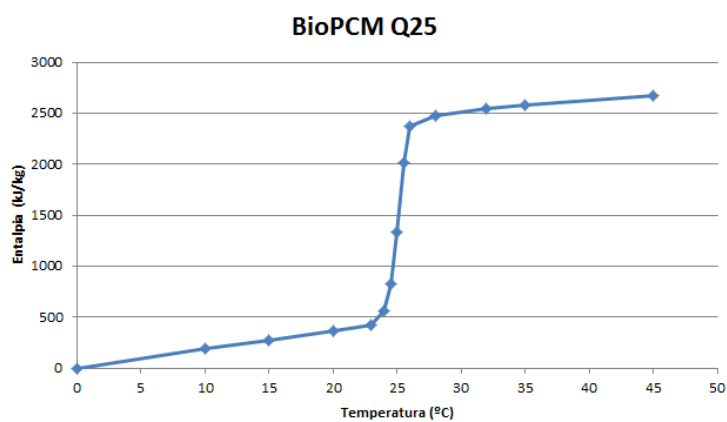


Figura A.5: Curva temperatura-entalpia do BioPCM™Q25, valores retirados do *DesignBuilder*

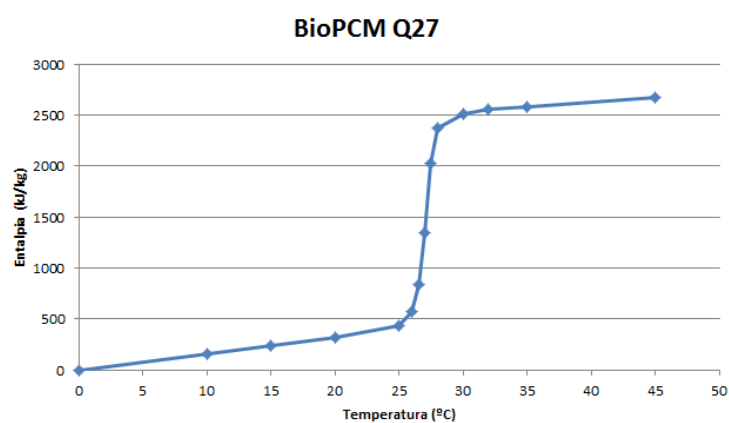


Figura A.6: Curva temperatura-entalpia do BioPCM™ Q27, valores retirados do *DesignBuilder*

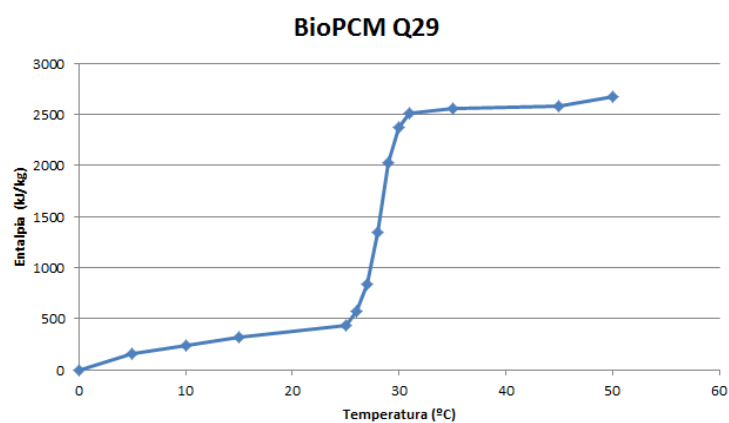


Figura A.7: Curva temperatura-entalpia do BioPCM™ Q29, valores retirados do *DesignBuilder*

A.2 Dados climáticos

Tabela A.1: Graus-dia exteriores para as quatro localizações simuladas

	Lisboa	Porto	Bragança	Faro
$GD_{arref} [^{\circ}C \cdot dia]$	105	16	82	65
$GD_{aquec} [^{\circ}C \cdot dia]$	1747	2192	3059	1262

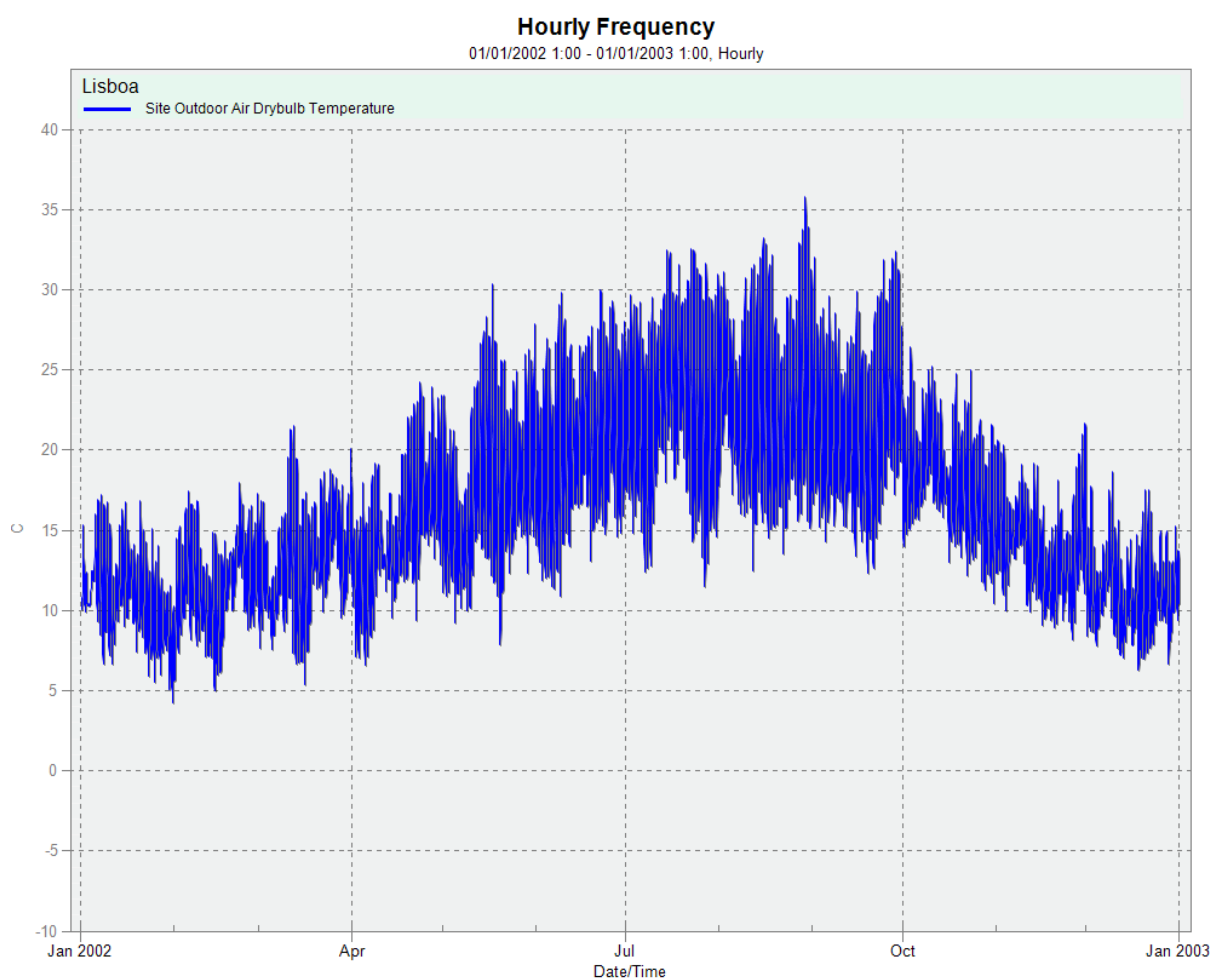


Figura A.8: Temperaturas exteriores anuais - Lisboa, retirado do *DesignBuilder*

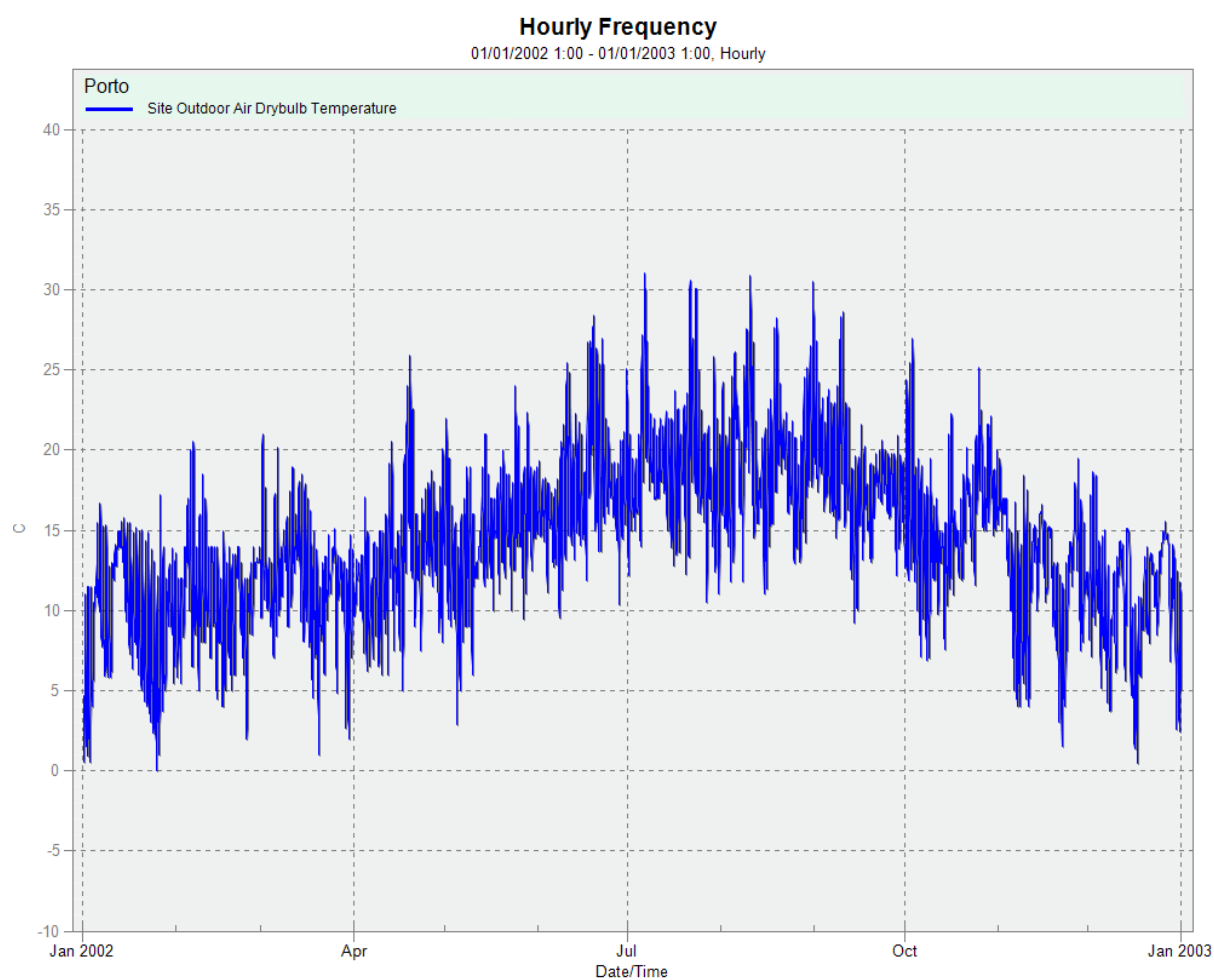


Figura A.9: Temperaturas exteriores anuais - Porto, retirado do *DesignBuilder*

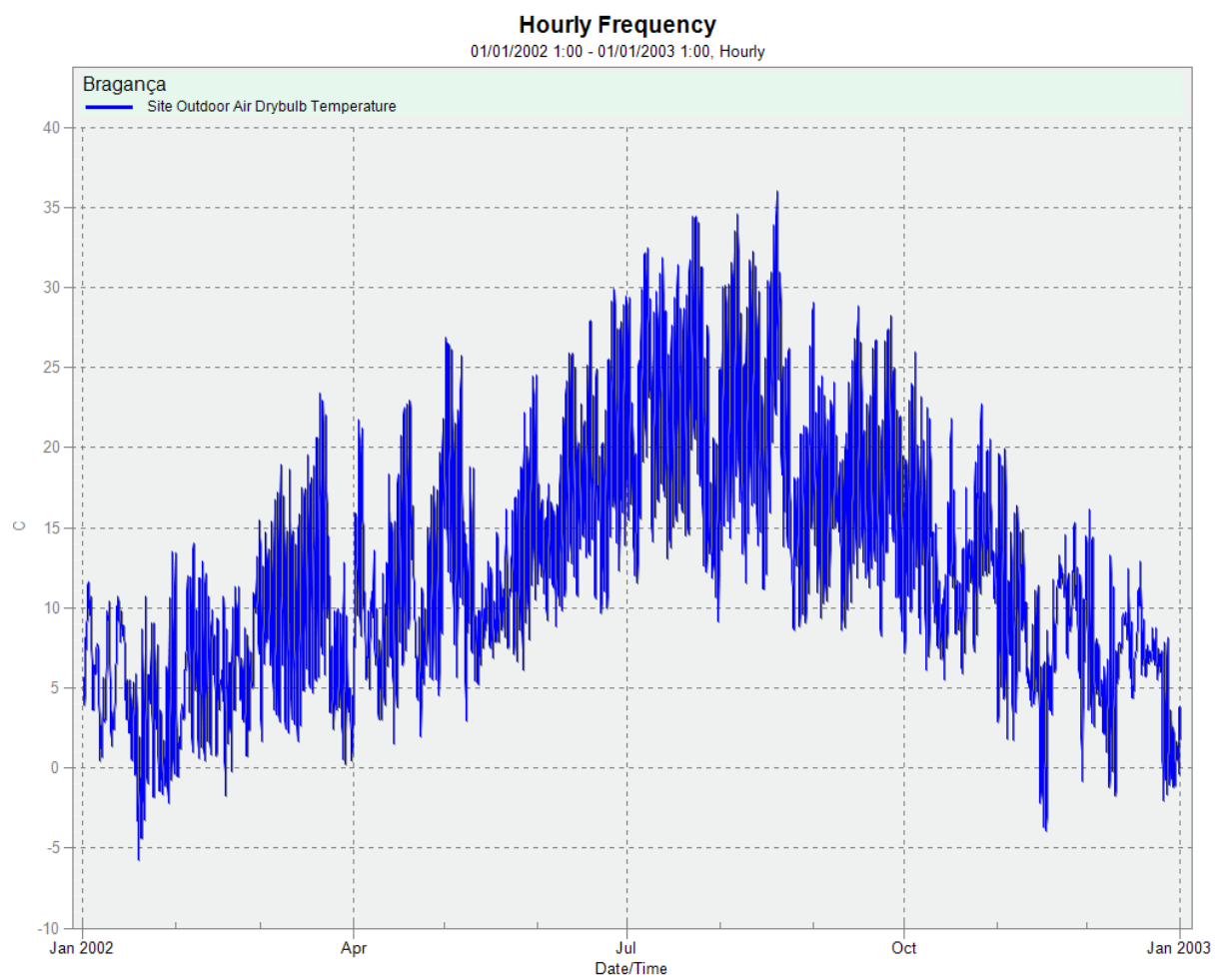


Figura A.10: Temperaturas exteriores anuais - Bragança, retirado do *DesignBuilder*

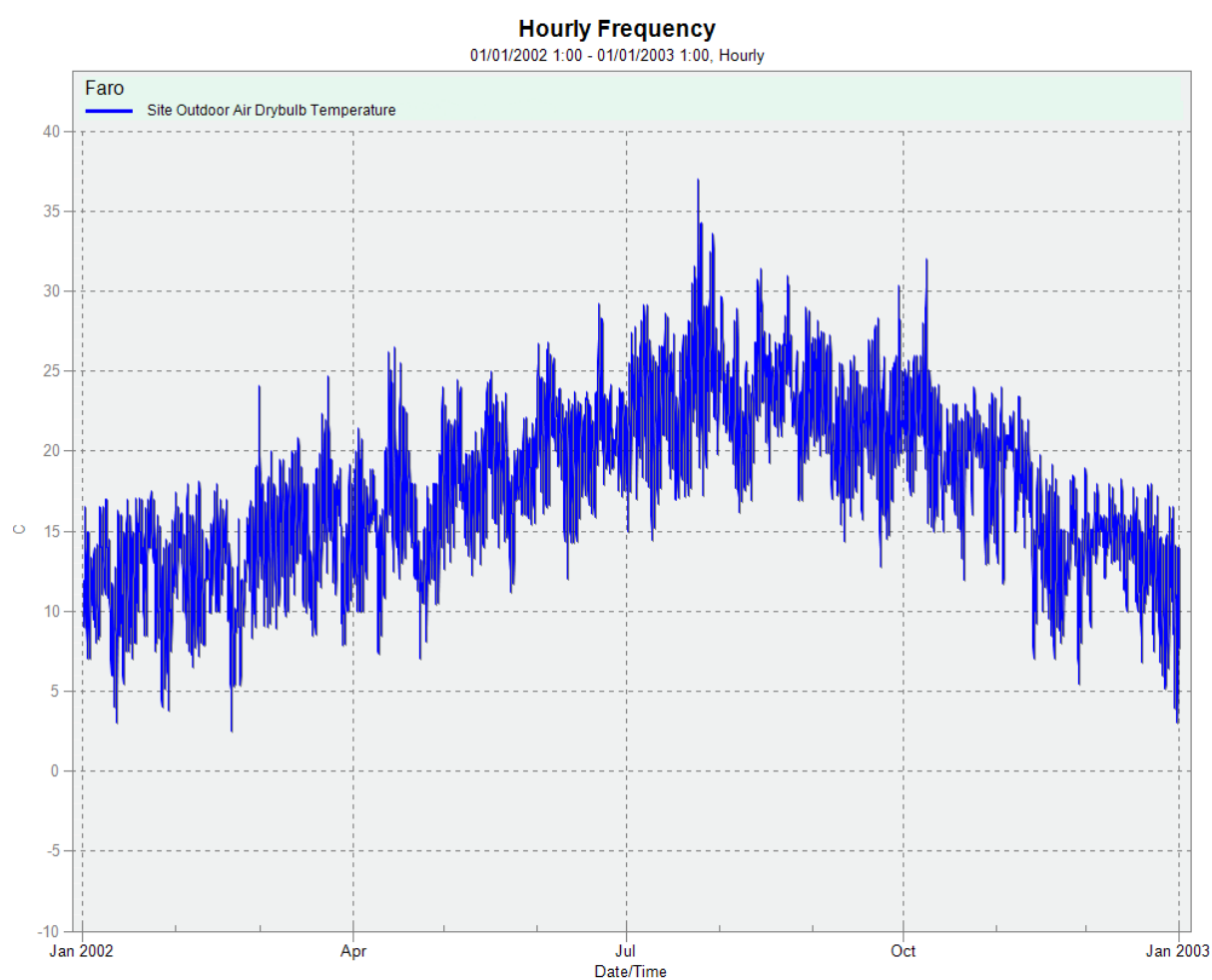


Figura A.11: Temperaturas exteriores anuais - Faro, retirado do *DesignBuilder*